



CONFIABILIDADE E POLÍTICA DE MANUTENÇÃO APLICADAS A SISTEMAS
DE MÁQUINAS DE PLATAFORMAS OFFSHORE

Leonidas Mauricio Condori

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

Rio de Janeiro
Abril de 2017

CONFIABILIDADE E POLÍTICA DE MANUTENÇÃO APLICADAS A SISTEMAS
DE MÁQUINAS DE PLATAFORMAS OFFSHORE

Leonidas Mauricio Condori

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:



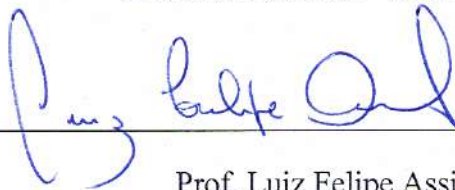
Prof. Severino Fonseca da Silva Neto, D. Sc



Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc



Prof. Luiz Antonio Vaz Pinto, D. Sc



Prof. Luiz Felipe Assis, D. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2017

Condori, Leonidas Mauricio

Confiabilidade e Política de Manutenção Aplicadas a Sistemas de Máquinas de Plataformas Offshore / Leonidas Mauricio Condori. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIII, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso
e Melo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 84-86.

1. Confiabilidade. 2. Política de Manutenção. 3. Análise Estocástico. I. Silva Neto, Severino Fonseca da *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

À minhas avós Gregória e Autuberta, aos meus pais Virginio e Victoria e aos meus irmãos Antoni e Jonás.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos do laboratório LEDAV (Laboratório de Ensaios Dinâmicos e Análise de Vibração), Eng. Ulisses Monteiro, Denise Cunha, Eng. Juan Bueno, Eng. Ricardo Ramirez e o Eng. Carlos Troyman, pela amizade.

Aos meus orientadores Severino Fonseca da Silva Neto e Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pela amizade, pela orientação, confiança e ajuda nas soluções dos problemas que ocorreram durante a pesquisa.

Ao Prof. Luiz Vaz Pinto; pela contínua ajuda nas sugestões, troca de ideias e incentivo no desenvolvimento dessa tese. Ao Eng. Frederico Novaes, que foi um grande amigo e excelente professor de programação LabVIEW, muito obrigado por sua dedicação. A Dona Carmem que foi a pessoa que me deu todo o carinho e apoio para continuar pelo caminho do sucesso e a mãe que me deu suporte aqui no Brasil.

A minha família, que sempre esteve nos Diagrama de Blocos difíceis ao meu lado, apoiando com palavras positivas e sempre dando força para continuar superando meus limites. A Isabella Costa por ser a companheira de vida que em todo momento me apoiou moralmente, e especialmente por ter me ajudado com o português, que não foi nada fácil no início, obrigado por tudo. Finalmente a Stefanny Garay por ser uma excelente amiga e irmã, que há mais de quinze anos está comigo em momentos bons e ruins, mesmo distante.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

CONFIABILIDADE E POLÍTICA DE MANUTENÇÃO APLICADAS A SISTEMAS DE MÁQUINAS DE PLATAFORMAS OFFSHORE

Leonidas Mauricio Condori

Abril / 2017

Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Oceânica

O trabalho consiste na determinação de tarefas de manutenção que devem ser programadas e efetuadas, baseado no estudo e na análise do histórico de falhas e reparos de sistemas de máquinas, considerando um estudo de confiabilidade. O objetivo é poder estabelecer as políticas de manutenção considerando a prioridade das tarefas a serem efetuadas.

Para estabelecer a hierarquia das tarefas de manutenção é usado o Número de Prioridade de Risco ou RPN, considerado na FMECA (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*). Para obter o valor do RPN são necessários três fatores: ocorrência, severidade e detectabilidade. A ocorrência será determinada por dois modelos estocásticos: o Modelo de Diagrama de Blocos e o diagrama de Markov, no entanto os outros dois fatores são estabelecidos pela experiência do pessoal técnico da planta.

Foram implantados esses dois métodos em LabVIEW®, realizando a análise dos modos de falha dos componentes de quatro sistemas. O software desenvolvido (GEMACC), foi usado também para a determinação de ações de manutenção e tempos limites de operação e segurança. Com o software se obteve excelentes resultados que atingem aos requerimentos do usuário e conferem os resultados das referências.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RELIABILITY AND MAINTENANCE POLICY APPLIED TO OFFSHORE
PLATFORM MACHINERY SYSTEMS

Leonidas Mauricio Condori

April/2017

Advisors: Severino Fonseca da Silva Neto

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Ocean Engineering

The work consists in the determination of maintenance tasks that must be scheduled and carried out, based on the study and analysis of the history of failures and repairs of machine systems, considering a reliability study. The objective is to be able to establish the maintenance policies considering the priority of the tasks to be carried out.

To establish the hierarchy of maintenance tasks, the Risk Priority Number (RPN), considered in FMECA (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis), is used. To obtain the RPN value, three factors are necessary: occurrence, severity and detectability. The occurrence will be determined by two stochastic models: the Moment Model and the Markov diagram, however the other two factors are established by the plant's technical staff experience.

These two methods have been implemented in LabVIEW®, performing fault mode analysis of four-system components. The developed software (GEMACC) has been also be used for the determination of maintenance actions and operational and safety time limits. The software obtained good results that meet the requirements of the user and check the results of the literature.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	5
3. Fundamentos Teóricos	8
3.1. Manutenção	8
3.2. Tipos de Manutenção	8
3.2.1 Manutenção Corretiva (MC)	9
3.2.2 Manutenção Preventiva (MP)	10
3.2.3 Manutenção Preditiva (MPd)	10
3.2.4 Manutenção Proativa (MPa)	11
3.3. Estratégias de Gestão de Manutenção	12
3.3.1. Manutenção Baseada na Condição (CBM)	12
3.3.2. Manutenção Produtiva Total (TPM)	13
3.3.3. Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)	14
3.3.3.1. Processo da RCM – Passos básicos	15
3.4. Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA)	18
3.4.1. Processos da Análise de Modos e Efeitos de Falhas	19
3.4.2. Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falhas (FMECA)	22
3.4.3. Avaliação da Criticidade e Política de Manutenção	25
3.5. Engenharia de Confiabilidade	26
3.5.1. Distribuição de Probabilidades	27
3.5.2. Atributos de confiabilidade	28
3.5.3. Confiabilidade de sistemas	30
3.5.3.1. Sistema em Série	30
3.5.3.2. Sistema em Paralelo	30
3.5.4. Decomposição pivotal	31
3.5.5. Análise de Markov	31
3.5.5.1. Análise de Markov para sistemas complexos	33
4. Metodologia de Cálculo Implantado no Software	35
4.1. Esquema de trabalho	35
4.2. Desenvolvimento do software e avaliação	38
4.3. Programa GEMACC	40
4.3.1. Implantação do módulo de Análise de Falhas	44

4.3.1.1. Sistema de Navegação Inercial (SINS)	45
4.3.2. Implantação do módulo de Análise de Falhas	57
4.3.2.1. Sistema de transformadores (TR)	59
a. Método de Diagrama de Blocos	60
b. Análise de Markov	64
c. FMECA	65
4.3.2.2. Sistema de aquecimento, resfriamento e energia (BCHP)	67
a. Método de Diagrama de Blocos	69
b. Análise de Markov	73
c. FMECA	77
4.3.2.3. Sistema de distribuição de potência (SDP)	78
a. FMECA	78
5. Conclusões e Recomendações	82
6. Referências Bibliográficas	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Tipos de Manutenção [11] _____	9
Figura 3.3 – Processos da Manutenção Centrada na Confiabilidade [22] _____	16
Figura 3.4 – Processo da FMEA [11] _____	21
Figura 3.5 – Probabilidade determinada pela área sob a curva _____	27
Figura 3.6 – Sistema em série _____	30
Figura 3.7 – Sistema em paralelo _____	31
Figura 3.8 – Diagrama de estados de dois componentes _____	32
Figura 4.1 – Diagrama de fluxo do processo de cálculo _____	35
Figura 4.2 – Software LabVIEW 2016 _____	38
Figura 4.3 – Fluxograma de Processos do Programa GEMACC. _____	39
Figura 4.4 – Tela principal do Software GEMACC _____	41
Figura 4.5 – Tela principal do módulo de Análise de Falhas _____	45
Figura 4.6 – Diagrama simplificado de bloques do SINS _____	45
Figura 4.7 – Diagrama simplificado de bloques do SINS _____	46
Figura 4.8 – Tela do módulo de Análise de Falhas com dados de entrada preenchidos. _____	46
Figura 4.9 – Tela de Edição dos Componentes _____	47
Figura 4.10 – Parâmetros de entrada com apenas distribuição Weibull. _____	50
Figura 4.11 – Resultados simulados com distribuição Weibull (3.900 horas) _____	50
Figura 4.12 – Resultados simulados com distribuição Weibull [1] _____	51
Figura 4.13 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull – SINS (3.900 horas) _____	51
Figura 4.14 – Resultados simulados com distribuição Weibull (2.600 horas) _____	52
Figura 4.15 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull (2.600 horas) _____	52
Figura 4.16 – Parâmetros de entrada com distribuição Exponencial. _____	53
Figura 4.17 – Resultados simulados com distribuição Exponencial (3.900 horas) _____	53
Figura 4.18 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial (3.900 horas) _____	54
Figura 4.19 – Resultados simulados com distribuição Exponencial. [1] _____	54
Figura 4.20 – Resultados simulados com distribuição Exponencial (2.600 horas) _____	55
Figura 4.21 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial (2.600 horas) _____	55
Figura 4.22 – Mudança da distribuição (Weibull – 2.600 horas) _____	56
Figura 4.23 – Resultado da mudança da distribuição (Weibull – 2.600 horas) _____	56
Figura 4.24 – Detalhes do resultado da mudança da distribuição (Weibull – 2.600 horas) _____	57

Figura 4.25 – Tela principal do módulo de Análise de Falhas e Reparos_____	58
Figura 4.26 – Tela de Edição de Parâmetros para transformadores (25 anos). _____	59
Figura 4.27 – Sistema de Transformadores simulado no programa GEMACC _____	60
Figura 4.28 – Resultados simulados com distribuição Weibull – TR (25 anos) _____	60
Figura 4.29 – Resultados simulados na referência para um transformador [2] _____	61
Figura 4.30 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull – TR (25 anos)_____	62
Figura 4.31 – Tela de Edição de Parâmetros para transformadores – TR (30 anos). __	62
Figura 4.32 – Resultados simulados com distribuição Weibull – TR (25 anos) _____	63
Figura 4.33 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull – TR (30 anos)_____	63
Figura 4.34 – Resultados da análise de Markov para transformadores de 25 anos. ____	64
Figura 4.35 – Resultados da análise de Markov para transformadores de 30 anos. ____	65
Figura 4.36 – Resultados da FMECA para transformadores simulado no GEMACC. 66	
Figura 4.37 – Detalhes da FMECA de transformadores no programa GEMACC. ____	67
Figura 4.38 – Sistema de aquecimento, resfriamento e energia (BCHP). _____	68
Figura 4.39 – Edição de parâmetros do sistema BCHP. _____	69
Figura 4.40 – Resultados por componente simulados com distribuição exponencial – BCHP (9 anos) _____	70
Figura 4.41 – Resultados por subsistemas simulados com distribuição exponencial – BCHP (9 anos) _____	70
Figura 4.42 – Resultados simulados com distribuição exponencial – BCHP (15 anos)	71
Figura 4.43 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial – BCHP (15 anos) _____	72
Figura 4.44 – Resultados por subsistemas simulados com distribuição exponencial – BCHP (15 anos) _____	72
Figura 4.45 – Resultados por subsistemas simulados com distribuição exponencial – BCHP (40 anos) _____	72
Figura 4.46 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial – BCHP (40 anos) _____	73
Figura 4.47 – Resultados da análise de Markov para sistema BCHP. _____	77
Figura 4.48 – Sistema de distribuição de potência simulado no programa GEMACC	78
Figura 4.49 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (transformador). _	79
Figura 4.50 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Disjuntor). _____	79
Figura 4.51 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Seccionadores). _	79

Figura 4.52 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Isolador). _____	80
Figura 4.53 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Fusíveis). _____	80
Figura 4.54 – Detalhes da FMECA (Transformador). _____	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Formatação da tabela da Análise de Modos e Efeitos de Falhas. [4] ____	20
Tabela 3.2 – Classificação da Severidade [30]_____	23
Tabela 3.3 – Classificação da Ocorrência [16]_____	24
Tabela 3.4 – Resposta de avaliação da confiabilidade do sistema. [1]_____	24
Tabela 3.5 – Classificação de Detectabilidade [4] _____	25
Tabela 3.6 – Níveis de Criticidade de um Sistema de Distribuição de Energia.[4] ____	26
Tabela 3.7 – Política de Manutenção de um Sistema de Distribuição de Energia.[5] _	26
Tabela 4.1 – Planilha de base de dados de falhas e manutenções. [30] _____	44
Tabela 4.2 – Matriz de avaliação de ocorrência _____	49
Tabela 4.3 – FMECA de transformadores de potência [3] _____	65
Tabela 4.4 – Estados de operação do subsistema elétrico – BCHP [6] _____	74
Tabela 4.5 – Estados de operação do subsistema de aquecimento – BCHP [6] _____	75
Tabela 4.6 – Estados de operação do subsistema de resfriamento – BCHP [6] _____	76
Tabela 4.7 – Resultados de taxa de falha e confiabilidade do sistema BCHP [6] _____	76
Tabela 4.8 – Erros percentuais dos valores obtidos pelo programa GEMACC _____	77

1. INTRODUÇÃO

Desde sua criação, a manutenção centrada na confiabilidade tem sido um tema muito importante, pois o desenvolvimento dele ajudou bastante a melhorar os processos tradicionais de manutenção, conseguindo assim priorizar componentes que serão mais benéficos para o sistema total, no entanto, ainda existe aquela dúvida de saber quando fazer uma manutenção e o tipo de manutenção poderia ser a ideal para um caso em particular. Atualmente há várias empresas interessadas em melhorar a vida útil dos equipamentos, com um único objetivo, que é adiantar os prazos de inspeção realizadas pelas classificadoras internacionais, e assim poder continuar com a operação sem nenhuma parada de Planta. Por isso existem muitas normativas ou regras classificadoras como a American Bureau of Shipping (ABS) e Det Norske Veritas (DNV.GL), que estabelecem parâmetros qualitativos que permitem padronizar os estados das máquinas, considerando o funcionamento, modos de falha, causas e efeitos, realizando previamente uma análise de Manutenção Centrada na Confiabilidade que depois servirá para apresentar à classificadora encarregada, assim se avaliará o adequado funcionamento da planta, evitando uma inspeção mais minuciosa.

O objetivo da dissertação é desenvolver um software utilizando métodos para a determinação da probabilidade de falha ou ocorrência, que é um fator considerado na Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha (FMECA), para o cálculo do valor do Número de Prioridade de Risco (RPN), ou também conhecido como Criticidade (C), que em conjunto com a análise de custos, nos permitirá decidir quais serão as tarefas de manutenção a serem efetuadas considerando um histórico de falhas e reparos que foram registrado no tempo de operação de um sistema, que será analisado, estabelecendo assim uma política de manutenção.

A determinação da probabilidade de falha na engenharia naval, pode ter várias aplicações, por exemplo, o estabelecimento dos limites de confiabilidade do sistema de operação e segurança para desenvolver uma metodologia de determinação do tempo, para realizar as manutenções das máquinas, considerando as ligações que têm os componentes do motor marítimo ou alguma outra máquina marítima que seja de interesse, tendo como base o histórico de falhas e reparos, para o estabelecimento de uma distribuição de probabilidade, com o objetivo de considerar aqueles tempos estabelecidos pelos limites para impedir futuras falhas que possam prejudicar o equipamento ou todo o sistema, que conseqüentemente acarreta também em gastos que afetam a produção [1]. Outra

alternativa seria determinar a viabilidade de adotar um sistema ou componente que atinja a requerimentos mínimos exigidos, como foi no caso de Ronaldo M. [2] que baseando-se em requisitos de confiabilidade é possível demonstrar a viabilidade de se adotar o conceito da válvula de gatilho atingindo assim os valores mínimos requeridos para disponibilidade e confiabilidade dentro dos sistemas submarinos de produção de petróleo.

Existem diferentes metodologias para determinar a probabilidade de ocorrência, no entanto, as considerações que se têm nesse trabalho dois casos diferentes onde se consideram apenas os dados de falhas e quando se possuem dados de falhas e reparos ademais a análise será feita por componente e como sistema, é assim que devido a ditas considerações se implantarão dois tipos de análises estocásticas: Método de Diagrama de Blocos e o Diagrama de Markov, pois atingem perfeitamente as necessidades de nossa análise. Esses métodos são baseados no histórico de falhas de máquinas, por um tempo de avaliação de vários anos de operação. Com os dados adquiridos, se deve realizar um teste de aderência para verificar a distribuição de probabilidade mais exata, que depois será a base para calcular os atributos de confiabilidade. Com esse cálculo prévio, é possível realizar a análise do método de diagrama de blocos, conhecendo os pontos críticos da distribuição e fornecendo limites para a confiabilidade do sistema, que será calculado pelo método de confiabilidade de sistemas, que nos permitirá obter um diagnóstico preliminar e a avaliação do tempo que se deseja analisar. Por outro lado o diagrama de Markov precisa de menos quantidade de dados (histórico de falhas) para a simulação, mas considera da mesma maneira as relações ou ligações que tem um componente com outro, dentro do sistema a ser analisado.

A partir dos métodos implantados pode-se obter o valor da probabilidade de falha. Assim com aquele valor, é possível estender a análise, conhecendo a prioridade das tarefas de manutenção e limites do mesmo RPN ou Criticidade que dependerá do valor para estabelecer uma política de manutenção, desde que se obtenha quais são os tipos de manutenção a serem feitas e a prioridade de cada uma delas, será o modelo de custos que nos permitirá selecionar as tarefas, que não só são benéficas para a operação adequada do sistema, mas também para poupar gastos em manutenções desnecessárias, por exemplo, se a máquina tivesse 10 componentes com a prioridade ordenada baseada no RPN, a política de manutenção estaria definida por aquele número, conseqüentemente gera o melhor custo - benefício para o proprietário do sistema. [1], [3]–[6]

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, onde o primeiro capítulo explica brevemente os objetivos da dissertação, dando a conhecer as metodologias de probabilidades que serão usadas como base para o cálculo dos resultados.

O segundo capítulo descreve de forma sequencial a revisão bibliográfica que mostra a evolução das técnicas de identificação de falhas, através da gestão de manutenção chamada de Manutenção Centrada na Confiabilidade e a Análise de Modos, Efeitos e Criticidades de Falhas, assim como também as metodologias que foram usadas por cada autor para preveni-las, as quais consideram três fatores importantes para seu desenvolvimento (severidade, detectabilidade e ocorrência), onde dois deles são fatores obtidos pela experiência e o último, que é a ocorrência (O), será obtido por meio de duas análises, que são: análise de Markov e método de Diagrama de Blocos, ambos usam as distribuições probabilísticas mais adequadas para os dados, e a engenharia de confiabilidade, para estabelecer atributos que servirão para as análises futuras.

O capítulo três detalha os fundamentos teóricos nos quais será baseada a dissertação, começando pela definição de manutenção e os tipos de manutenção, focando-se especificamente na Manutenção Centrada na Confiabilidade, de igual forma se explicam os processos da Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha, apresentando ao final as bases para estabelecer uma política de manutenção. Também apresentará as teorias da engenharia de confiabilidade, começando pelas distribuições de probabilidade que serão usadas, e continuando com os atributos de confiabilidade tanto da distribuição exponencial e distribuição de Weibull, depois será explicada a análise de Markov e o estudo em estado estacionário por meio de diagrama de blocos e análise da taxa de falhas e reparos que previamente foram obtidas por uma análise anterior.

O capítulo quatro mostra a proposta da tese onde se mostra o processo de cálculo que será feito mediante fluxogramas com as considerações dos quatro modelos que serão analisados, também se apresentará a descrição e elaboração do programa que apresenta a análise de confiabilidade com dados de entrada e que finalmente consegue-se estabelecer uma política de manutenção considerando os parâmetros iniciais e ligações entre componentes. Portanto se apresenta também o fluxograma com os processos necessários com a lógica do programa. Ademais, como o programa será elaborado em LabVIEW também se apresentará o fluxograma utilizado para implantar os métodos a serem usados, tanto o método de Diagrama de Blocos quanto a análise de Markov.

O capítulo cinco, apresentará as conclusões e recomendações da dissertação considerando os objetivos e limitações e baseados nos modelos estabelecidos com a implantação no programa GEMACC.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1980, o Departamento de Defesa dos EUA [7] desenvolveu uma metodologia que envolve a severidade e a probabilidade de ocorrência chamada Análise de Modo, Efeito e Criticidade de Falhas (FMECA), relacionando-as em uma matriz de criticidade, capaz de definir os itens e os modos de falhas críticos, usando dois números: número de criticidade de modo de falha e o número de criticidade do item. A matriz é representada em um gráfico de severidade versus número de criticidade e a probabilidade de ocorrência, assim identifica quais são os itens que têm maior prioridade de manutenção. Em 1995, foi introduzido o método da Gestão Baseado em Risco por Richard B. Jones [8] que se foca na análise dos tempos de falha para propor uma distribuição de probabilidade de falha, que conseqüentemente serão usados para os cálculos dos atributos da confiabilidade e introduz a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) usando o número de risco baseado na severidade e a probabilidade de ocorrência, assim é capaz de estabelecer uma matriz de probabilidade e consequência onde considera os níveis altos e baixos, conseguindo dessa maneira determinar as ações que têm maior prioridade e realizar sua manutenção. Por outro lado, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), é ainda mais desenvolvida com maior detalhe por John Moubray [9], em 1997, que mostra os procedimentos, passo a passo, para a identificação dos modos das falhas, tarefas a serem efetuadas e os tempos que são considerados dentro da análise, usando como ferramenta a Análise de Modos e Efeitos de Falhas como uma análise qualitativa, focando-se depois no tempo para a seguinte possível falha. O esquema de trabalho é baseado em diagramas de decisão que considera cada possível opção de falha e atribuindo valores de risco que depois permitirá determinar as ações de manutenção a serem feitas.

É necessário que as ações de manutenção sejam classificadas ao longo do tempo. Surgiram assim muitas propostas, que através dos anos foram melhorando a perspectiva, assim em 2004, R. Keith Mobley [10] propõe três tipos de manutenção: manutenção melhorada, preventiva e corretiva como e cada um deles se subdivide em outros tipos de manutenção. Em 2007, André Paegle e Norberto Moro [11] propõem três tipos de manutenção, as quais são as mais comuns e conhecidas por especialistas envolvidos nessa área; que são manutenção corretiva, preventiva e preditiva. O conceito evolui ainda mais quando em 2008 a NASA [12] estabelece mais um tipo de manutenção, além daqueles três já conhecidos, chamado de manutenção proativa, que também é conhecida como uma manutenção preditiva melhorada, a análise que se faz é mais minuciosa e considera

históricos de falhas e reparos do tempo de operação das máquinas, incluindo a engenharia de confiabilidade na análise e cálculos.

Os tipos de manutenção que foram desenvolvidos são para determinar as ações que serão efetuadas quando uma falha acontecer numa máquina, mas para a determinação do tipo ou tipos de manutenção devem ser usados para um programa de manutenção é necessária uma metodologia de gestão de manutenção. É assim que em 2014, Deepak Prabhakar P. e Jagathy Raj V.P.[13] definem três tipos de gestão de manutenção e os comparam, assim determinam que a RCM é descrita como a mais eficaz e que gera mais rentabilidade.

Sendo definida a metodologia de gestão de manutenção, é importante a necessidade de ter uma noção mais analítica na FMECA para uma avaliação mais exata do RCM. Devido a isso em 2002, Sidnei G. [14] realiza a análise de confiabilidade de equipamentos submarinos de segurança de sondas flutuantes considerando a análise de modos e efeitos das falhas, dessa forma conheceria a tendência de falhas dos componentes e possíveis ações a serem feitas baseado nas observações. Em 2008, Gustavo C. [15] realiza um estudo de confiabilidade de sistemas para a manutenção de uma plataforma FPSO, e que não usa apenas uma análise qualitativa mas também quantitativa baseando-se no nível de severidade e frequência para estabelecer uma matriz de risco. Por outro lado também era necessário considerar mais um fator dentro da determinação das ações de manutenção, é assim que várias referências como [3]–[5], [16]–[19] inserem o Número de Prioridade de Risco (RPN) ou apenas o Número de Risco, onde consideram mais um fator chamado de detectabilidade. O Número de Risco define a prioridade das atividades de manutenção a serem efetuadas, definindo o tipo de manutenção que será utilizado. Para o cálculo desse número é necessária a multiplicação dos três fatores e baseado naquele valor e limites que são pré-definidos, se estabelece uma política de manutenção dependendo do nível de risco que possui o componente. Tanto assim foi a importância do RPN que foram criados softwares que permitem calcular o valor da criticidade, e ordenar os componentes de acordo à prioridade de sua manutenção. Uma aplicação foi em 2010, quando H. Arabian-Hoseynabadi *et al.* [19], usaram o software *Relex Reliability Studio 2007 V.2*, para obter os valores da criticidade de duas turbinas eólicas e compará-las para saber qual era mais eficiente por meio do seu valor de RPN, quanto menor fosse o valor seria mais confiável, além disso se verificaria a mudança da taxa de falha, pois quando ele diminui significa que a falha terá menos probabilidade de acontecer. Outra aplicação

foi em 2013, quando Reza *et al.* [18] calcularam os valores da criticidade com o software XFMEA, ou seja que o programa foi empregado para obter o valor de RPN para conhecer a prioridade de manutenção e, conseqüentemente, programa as atividades de manutenção apenas dos primeiros cinco componentes, que seriam os primeiros de acordo com a ordem que estabelece o RPN (de maior a menor). Para ambos os casos se avalia como afetaram as medidas usadas nos custos de manutenção, porém, isso apenas é uma verificação da melhora do processo, pois não é realizado nenhum cálculo referente aos custos de manutenção.

Em 2015, X. Jiang, *et al.*[1], dão uma definição mais desenvolvida do Número de Risco, e o conceito que ele tinha evolui, considerando três constantes que acompanham os fatores que fazem parte do RPN, cujos valores são determinados pelo pessoal técnico ou operários das máquinas, que indicam o peso ou importância de cada fator do RPN dentro dele mesmo; com essas considerações se obtém um novo valor, chamado de Número de Prioridade de Manutenção (MNP). A partir de um diagrama que une os componentes (para conhecer as dependências) e a metodologia GO Methodology, consegue-se obter o resultado final e os parciais das probabilidades de falha e confiabilidade. O único detalhe que apresenta essa análise, é que a lógica envolvida para fazer essa análise no diagrama, dentro de um programa, é bem complicada de implantar quando há muitos componentes.[20]

Como anteriormente foi mencionado para a análise do sistema total é necessário saber a distribuição dos componentes e dependências entre eles, e sabendo que a metodologia de GO Methodology é dificultosa de implantar em sistemas complexos e ainda mais quando se deseja programá-la. Se repara na necessidade de analisar estados de operação da máquina, considerando as dependências ou ligações que existem entre os componentes, assim em 2013, J. Wang. *et al.*,[6] realizaram a análise dos atributos de confiabilidade do sistema completo de uma turbina a gás, utilizando o Modelo de Markov, e considerando uma distribuição exponencial nos dados do histórico das falhas. Em 2015, B. Mkandawire, *et al.*[3], utilizaram aquele conceito do Diagrama de Markov, mas para introduzir o fator de ocorrência na análise FMECA e compará-lo com o resultado obtido pelo método de Diagrama de Blocos onde se decide uma distribuição da probabilidade.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Manutenção

Pode-se entender como manutenção o conjunto de precauções técnicas necessárias para a operação regular e contínua de uma máquina, equipamento, ferramentas ou instalações. Essas precauções envolvem conservação, restauração, adaptação, substituição e prevenção. Se estamos retificando as pás de uma hélice, nós estamos restaurando-as e se estivéssemos trocando de pistão em um motor, nós estaríamos substituindo-o.[10], [21]

Em termos gerais, os objetivos relacionados com a manutenção em uma empresa são:

- Manter o equipamento e a maquinaria em contínuo trabalho, com o propósito de garantir a produção normal e a qualidade do produto que deve sempre cumprir com os padrões de produção.
- Prevenir prováveis falhas ou alguma função que impeça o desenvolvimento adequado dos elementos das máquinas.

Para conseguir os objetivos que foram mencionados, é necessário realizar um programa adequado de manutenção, baseado em critérios que possam classificar o que fazer em cada situação porque nem todas as falhas que possam acontecer serão resolvidos da mesma forma. [21]

A manutenção ótima, e as ações que são envolvidas nela, de uma máquina qualquer, é aquela que permite obter a maior disponibilidade para a produção, no tempo que ela está em serviço e considerando um custo razoável [22].

As ações que devem ser realizadas pelo programa de manutenção, precisam de uma classificação que possa definir quais tipos de ações correspondem a cada uma delas. Evidentemente, conforme o desenvolvimento da tecnologia e das novas técnicas de manutenção, os conceitos podem mudar.

3.2. Tipos de Manutenção

Existem quatro tipos principais de manutenção que são considerados neste trabalho, como está ilustrado na Figura 3.1 [12]



Figura 3.1 – Tipos de Manutenção [12]

3.2.1 Manutenção Corretiva (MC)

A manutenção corretiva envolve reparos, que são feitos no momento que acontece uma falha, que podem ser reparos de emergência, correções e qualquer outra atividade não programada com antecipação. Atualmente, a maioria das manutenções que são realizadas são corretivas no contexto da indústria, em geral. É melhor fazer uma manutenção preditiva, preventiva ou proativa, para reduzir a necessidade de correções de emergência. Quando uma falha é evidente, por exemplo, a quebra de uma biela num motor marítimo é muito simples de perceber e relativamente fácil de manter, porque as experiências dos operários estão envolvidas nessa decisão. A resolução dos problemas e o diagnóstico da detecção de falhas são um grande fator de consumo de tempo para manutenção. Quando o problema é obvio, geralmente pode ser facilmente corrigido, mas as falhas que são intermitentes e as ocultas, são as que consomem mais tempo, mas com o diagnóstico as causas podem ser isoladas e logo reparadas.[10]

A ideia de fazer a manutenção corretiva é considerar os itens cuja substituição seja simples de realizar, assim como aqueles que não são considerados como componentes críticos para a operação da máquina, ou cuja, probabilidade de falha é bem baixa. [10], [12]

Há um critério que considera que deve ter componentes que precisam só de manutenção corretiva, chamado de “Run to Failure” ou “operar até a falha”, pois não vale a pena planejar uma manutenção especializada quando o componente não é essencial para o funcionamento. [10], [12], [13]

3.2.2 Manutenção Preventiva (MP)

A manutenção preventiva (MP) é uma técnica importante para as atividades de manutenção. A equipe de manutenção é responsável pela parte mais importante, a manutenção total do sistema. A manutenção preventiva pode ser descrita como atividades que fornecem cuidado e manutenção com o propósito de manter o equipamento ou a instalação em condições de operação ótimas, realizando inspeções sistemáticas, detecção e correção de falhas, inclusive antes de elas acontecerem ou se tornarem uma falha muito mais complicada de reparar. Uma das metas da manutenção preventiva é melhorar a vida produtiva do equipamento, reduzindo o número de falhas do componente ou equipamento crítico, permitindo assim um melhor planejamento, organização e determinação do agendamento das atividades de manutenção, minimizando as perdas de produção que são ocasionadas pelas falhas do sistema, assim também é promovida a saúde e a segurança do pessoal da manutenção.[21]

A manutenção preventiva tem vantagens, pois as programações das tarefas são efetuadas com um padrão já conhecido que permite prevenir possíveis falhas. Um claro exemplo são os motores Caterpillar, onde as ações de manutenção estão estabelecidas em intervalos de tempos conhecidos (2.500 horas, 5.000 horas, 11.000 horas, etc.). Embora tenha essa vantagem, essas ações que são efetuadas nos componentes, não consideram a condição atual deles ou da máquina toda. E assim, com a manutenção programada para acontecer às dez mil horas, se alguma falha ocorrer às sete mil horas, por exemplo, não será reparada, podendo causar uma falha maior, ou até mesmo a falha da máquina.[12]

3.2.3 Manutenção Preditiva (MPd)

A manutenção preditiva envolve tendências e análises do desempenho dos parâmetros da máquina, e as operações para detecção e identificação de falhas, antes de elas acontecerem, e prevenir o desenvolvimento de uma falha maior. A metodologia de detecção e diagnóstico dos problemas efetuadas no momento (online), é definitivamente o caminho mais desejável para manter as máquinas em operação adequada. O grande desafio é detectar as falhas com antecipação, quando os defeitos ou problemas não são de grande impacto no funcionamento, e se a natureza do problema for identificada quando a máquina estiver em funcionamento gerará os seguintes benefícios:[23]

1. Desligamento para reparos poderão ser agendados para uma data conveniente;
2. A programação do trabalho, que inclui o pessoal técnico, ferramentas e peças de reposição poderá ser preparada com antecipação antes de desligar a máquina;
3. O dano extenso produzido por uma falha forçada poderá ser evitado;
4. O tempo de reparo poderá ser mantido no mínimo, e assim também se reduzirá o tempo de inatividade da máquina;
5. Elevados custos de teste e erro para resolver o problema poderão ser evitados uma vez que a análise identifique a natureza do problema;
6. Máquinas em boas condições de trabalho poderão continuar, contanto que não haja falhas em seu desenvolvimento. O tempo e o dinheiro não serão desperdiçados para desmontagem das máquinas já que elas estarão operando apropriadamente.

Em comparação com a manutenção preventiva, a manutenção preditiva não tem um padrão de falhas conhecido, mas tem padrões de falha aleatórios, que são baseados em um histórico de falhas obtido pela monitoração contínua de sensores que indicam limites (máximos e mínimos) de operação, assim quando uma falha supera os limites, as ações de manutenção serão realizadas. A desvantagem desse tipo de manutenção é que não estabelece frequência ou periodicidade para uma futura falha que possa acontecer, pois basicamente considera apenas a monitoração e controle de parâmetros de funcionamento da máquina. [10], [12], [24]

3.2.4 Manutenção Proativa (MPa)

A manutenção proativa foca-se em impedir os modos de falha que continuamente acontecem e em minimizar os custos dos equipamentos. Há duas áreas principais da manutenção proativa. A primeira, é a das habilidades proativas e tecnologias proativas, e a segunda, é a proatividade a partir de uma perspectiva de programação.[21]

Geralmente, estamos tão envolvidos na manutenção que esquecemos de planejar a eliminação do problema desde a sua fonte, assim são necessárias ferramentas ainda mais especializadas, como a Análise de Causa Raiz da Falha (RCFA) considerando mais a exploração da idade como um fator determinante de futuras falhas. A engenharia de confiabilidade é usada como ferramenta de análise de prováveis falhas e reparos, baseada num histórico, estabelecendo uma perspectiva de análise considerando o tempo de vida que já foi usado pela máquina e predizendo as falhas que precisam ser reparadas. Esse tipo de manutenção é uma grande oportunidade de prevenir falhas, em vez de atuar na

hora, diminuindo custos, além de tempo valioso (especialmente para máquinas de elevado valor de aquisição) que pode ser usado para a continuação da produção [12].

Uma grande vantagem que tem a manutenção proativa quanto às outras é a melhora da manutenção em si, através do aperfeiçoamento do projeto, instalação, processos de manutenção, execução e programação, além disso o contínuo feedback faz com que os processos e as técnicas de manutenção melhorem na medida que são aplicadas.[12]

3.3. Estratégias de Gestão de Manutenção

O desenvolvimento de novas estratégias de manutenção tem sido lento, porém, nas últimas duas décadas, tem sido renovado o foco na manutenção, principalmente devido à pressão que se tem na operação e na necessidade de redução de contínuas paradas da planta. Este enfoque gerou a adoção de três estratégias de manutenção diferentes, as quais estão apresentadas na Figura 3.2. [9], [13], [24]

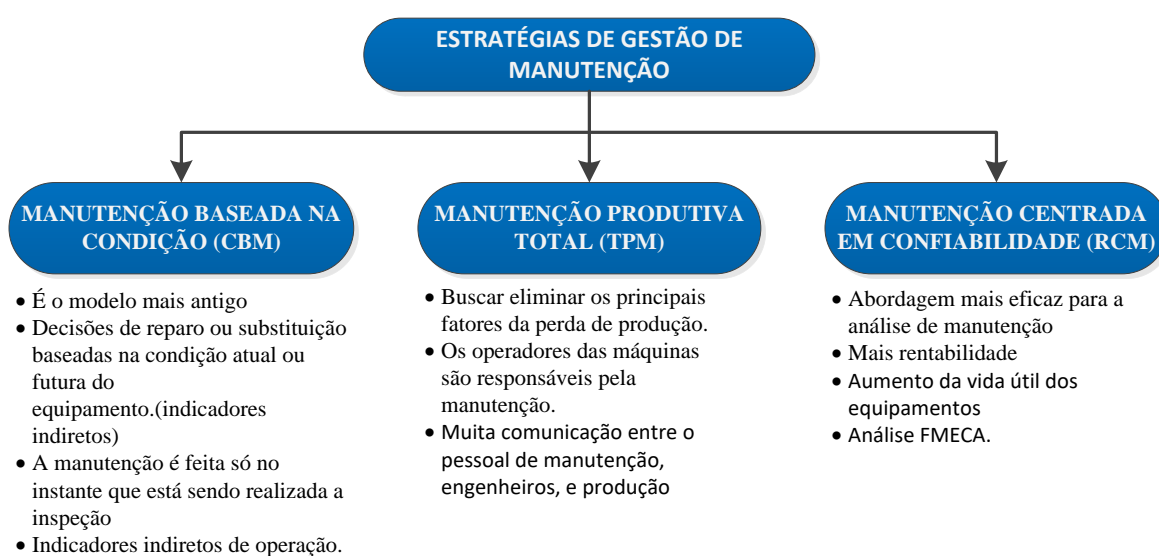


Figura 3.2 – Estratégias de Gestão de Manutenção [9], [13], [24]

3.3.1. Manutenção Baseada na Condição (CBM)

Este é o modelo mais antigo dos três que serão comparados aqui. A manutenção baseada na condição é uma filosofia que postula decisões de reparos ou substituições a respeito da condição atual do equipamento e dos bens futuros. Essa estratégia reconhece que a mudança de condição e/ou do desempenho da máquina é o principal motivo para efetuar a manutenção. O tempo ideal para desenvolver a manutenção é determinado por uma efetiva monitoração da máquina, ou do bem que seja analisado, como também seus

componentes ou partes. A avaliação do estado muda de uma simples inspeção visual para o desenvolvimento de uma inspeção automatizada, usando várias ferramentas e técnicas de monitoração. O objetivo do CBM é minimizar os custos totais de inspeções e reparos através da aquisição e interpretação de dados intermitentes ou contínuos relacionada com a condição de operação dos componentes críticos da máquina.[13], [23]

A manutenção baseada na condição tem diferentes formas de aplicação, desde a mais simples até a mais complexa. Porém, a mais comum em quase todas as indústrias é adotada é onde o foco é a aquisição dos dados, prognósticos e correções com vários graus de automação.[13]

Como ponto de partida, são necessários indicadores representativos de monitoração da condição do equipamento por um período de tempo. Quando for iniciada a aquisição de dados, os indicadores estarão configurados para dar um alarme considerando níveis predeterminados de deterioração, dessa maneira as ações de manutenção serão efetuadas para conseguir os níveis aceitáveis de operação da máquina. O conceito mencionado significa que no momento em que as ações são efetuadas a máquina deve ser desligada, ficando assim fora de serviço. [23]

A estratégia do CBM tem como principal premissa o critério usado na Manutenção Preventiva (MP), mas a diferença são os critérios para determinar as tarefas a serem efetuadas, considerando as necessidades da máquina e a criticidade da falha. É importante mencionar também que, em muitos casos, ao usar indicadores indiretos para determinar se um componente falhar, pela complexidade de monitoração deles mesmos, é bem comum considerar indicadores como pressão e temperatura de alguns componentes para saber a condição de outros.[13], [23]

3.3.2. Manutenção Produtiva Total (TPM)

A manutenção produtiva total é uma estratégia que se foca na eliminação dos principais fatores da perda de produção. As eliminações dos processos iniciam-se desde o restabelecimento da empresa, e conseqüentemente, a manutenção autônoma e programada e o planejamento da manutenção preventiva. A manutenção produtiva total é usada para a modificação da manutenção preventiva, e a diferença está na base dos resultados obtidos na mesma operação, e não naqueles que o fabricante da máquina fornece. [24]

A manutenção se divide em três níveis, os quais são baseados na operabilidade e pessoal especialista. Os três níveis se dividem da seguinte maneira: o primeiro nível é a manutenção independente realizada pelo operador da máquina, o segundo é a cargo do pessoal de manutenção e o último nível é o fabricante.[13]

O objetivo principal da manutenção produtiva total consiste em fazer sentir ao operador, responsável pelo trabalho de manutenção tendo especialização na sua área. A ideia da responsabilidade do trabalhador, mostra que essa estratégia é baseada na comunicação. Requer que operadores, pessoal de manutenção e engenheiros, colaborem de forma coletiva, e obviamente consigam entender uns aos outros, em poucas palavras, falar a mesma língua técnico-profissional. A manutenção produtiva total descreve a relação existente entre duas áreas importantes dentro de uma empresa; produção e manutenção conseguindo, assim, uma melhora contínua e um produto de qualidade, com eficiência operacional, produtividade e segurança.[24]

Conforme a estratégia seja desenvolvida dentro da empresa, cada vez menos será necessário o pessoal de manutenção, pois, a especialização por parte dos operários permitirá ter dois profissionais, que fazem trabalhos diferentes, em apenas um, com um custo menor. Definitivamente, isso não quer dizer que a empresa unicamente implantará a TPM, pois não gerará bons resultados sempre. É recomendável que esse método seja misturado com outro tipo de estratégia de manutenção, assim com o desenvolvimento da tecnologia a especialização se torna mais difícil, então a análise mais minuciosa só é obtida pelos especialistas.[13], [24]

3.3.3. Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)

A manutenção centrada na confiabilidade, é um processo usado neste último período com mais frequência devido à sua maior efetividade, eficácia e abordagem da manutenção. Com essa estratégia é possível definir ações que, quando forem implantadas, reduzirão a probabilidade de falha, logo ela irá gerar mais rentabilidade. A orientação da RCM destina-se à combinação ideal de ações baseadas no estado, no tempo ou nas ações baseadas no ciclo ou operar até a falha (*Run to Failure*). A manutenção centrada na confiabilidade é um processo contínuo de coleta de dados do desempenho do sistema em operação, e esses dados são usados para melhorar o projeto e futuras manutenções. Estas estratégias de manutenção, ao invés de serem aplicadas independentemente, são integradas e aproveitadas em seus pontos fortes para poder otimizar a confiabilidade e a

eficiência das instalações e dos equipamentos, dessa maneira se consegue diminuir os gastos que são efetuados no período de vida útil.[12], [25]

A análise da manutenção centrada na confiabilidade tem sido usada por um período longo para os aviões, espaço, defesa e indústria nuclear, onde uma falha ou avaria poderia implicar num resultado desastroso, como perdas de vida, implicações na segurança nacional, e /ou um impacto extremo no meio ambiente. Uma rigorosa análise da RCM é baseada no detalhe da Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA), que envolve também a utilização de cálculos probabilísticos para determinar a confiabilidade do sistema todo e de seus componentes com a ajuda da engenharia da confiabilidade. A análise é usada para determinar as tarefas de manutenção apropriadas para corrigir cada modo, as falhas identificadas e as suas conseqüências.[12]

A análise do processo da manutenção centrada na confiabilidade foca-se nas funções das instalações, nas máquinas e em seus componentes, nas conseqüências das falhas e nas medidas para prevenir ou lidar com cada falha funcional, considerando os níveis em que elas possam acontecer. A melhor maneira de ter e estabelecer uma ideia de como funciona a estratégia, é obtendo respostas efetivas às seguintes perguntas:[12], [26], [27]

1. Quais são as funções e padrões de desempenho do item no seu contexto operacional atual?
2. De que modo ele falha em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha operacional?
4. O que acontece quando ocorre cada falha?
5. De que forma cada falha tem importância?
6. O que pode ser feito para prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa preventiva?

3.3.3.1. Processo da RCM – Passos básicos

A manutenção centrada na confiabilidade não é um processo autônomo, pois ele deve que ser uma parte integrada dos programas de operação e manutenção. A implantação do processo da RCM, implica em mudanças que devem ser estabelecidas no processo de trabalho, desenvolvida por o pessoal a cargo das diferentes tarefas aos diferentes níveis de responsabilidade. Para uma adequada implantação da RCM, considerando as mudanças que serão feitas, é importante que o gestor da estratégia mostre seu compromisso com aquelas mudanças, eventualmente pode ser sobre uma declaração

de políticas e de envolvimento do pessoal, e essas medidas que serão tomadas, estabelecerão o envolvimento daqueles que estarão envolvidos pelas mudanças a serem efetuadas. A estratégia funciona melhor quando é empregada como um processo de baixo para cima envolvendo aqueles que trabalham diretamente nas operações e manutenção de instalações, equipamentos e componentes. [11], [25]

Sendo assim, para estabelecer adequadamente o processo da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), ela é dividida em seis passos que estão apresentados na Figura 3.3.[25]

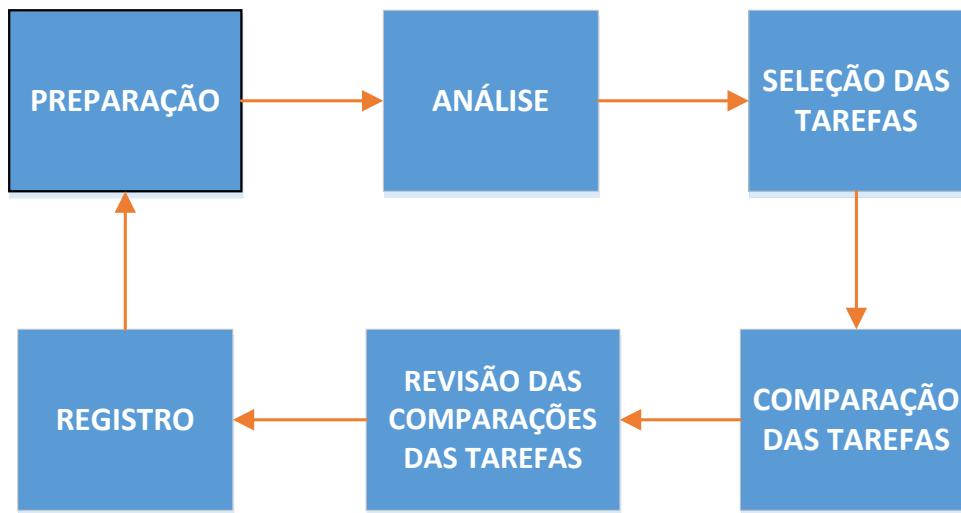


Figura 3.3 – Processos da Manutenção Centrada na Confiabilidade [25]

a) Preparação

Essa primeira, a preparação, é conformada por vários passos, que basicamente envolvem a seleção do sistema que se deseja analisar, coletando os dados necessários para a análise. Além disso, regras básicas ou critérios usados na seleção e no processo de análise devem ser estabelecidos. Por exemplo; principais pressupostos, critério de avaliação crítica, critério de avaliação não crítica e estabelecimento do processo de revisão. Em resumo, as etapas podem ser as seguintes: [25]

- Seleção do sistema;
- Definição dos limites do sistema;
- Aquisição da documentação e materiais;
- Entrevistas com o pessoal da planta.

b) Análise

Uma vez que o sistema selecionado para a análise e a preparação tenham sido completados, a análise pode começar. Um fator muito importante nesta etapa, é a

experiência adquirida, para assim tomar uma decisão efetiva. Esta experiência poder ser da equipe de trabalho ou pode ser realizada por especialista de fora com mais experiência na área.[25]

É importante a participação de todo o pessoal com uma experiência considerável na operação e manutenção da planta, para desenvolver adequadamente uma análise.[25]

Em conclusão, o objetivo dessa etapa de análise é montar uma equipe com uma adequada gama de qualificações e experiência na tarefa a realizar. Essa etapa envolve as seguintes fases: [25]

- Identificação das funções do sistema;
- Análise de falha do sistema funcional;
- Identificação do equipamento;
- Coleta de dados de confiabilidade e desempenho;
- Identificação de modos de falha;
- Identificação de efeitos de falha;
- Determinação da criticidade dos componentes.

c) Seleção de tarefas

Uma vez que a análise tenha sido concluída, o passo seguinte do processo é distribuir as tarefas de manutenção adequadas para os sistemas e equipamentos identificadas no processo de análise, de acordo com o significado que lhes é atribuído. Esta parte do processo procurará estabelecer adequadamente os meios mais rentáveis para conseguir uma estratégia de manutenção, no que diz respeito a alcançar segurança e confiabilidade. [25]

O processo de seleção de tarefas usa várias formas para tomada de decisão lógica a fim de obter conclusões de uma maneira sistemática. Os resultados podem incluir: [10], [25]

- Manutenção preventiva;
- Monitoramento da condição;
- Inspeção e testes funcionais;
- Operar até a falha.

d) Comparação de tarefas

Quando a seleção de tarefas for concluída e analisada, as recomendações decorrentes do processo de seleção de tarefas serão comparadas com as práticas de manutenção atuais. O propósito desta comparação é identificar as mudanças necessárias para o

programa de manutenção e o impacto nos recursos e outros compromissos que possam surgir.[25]

e) Revisão da comparação de tarefas

Os resultados da análise resultarão em mudanças do programa de manutenção. É muito importante que estas mudanças sejam consistentes com a filosofia da manutenção da planta e com as obrigações reguladoras e sociais. Por esse motivo, é importante que o processo e os resultados sejam submetidos a uma análise final. [25]

f) Registro

A Manutenção Centrada na Confiabilidade deveria fazer parte de um programa de vida. Os resultados do processo de análise e a implantação das recomendações terão um impacto na eficácia da operação e nos programas de manutenção. Portanto, é importante que todas as decisões, as bases delas e aquelas que são envolvidas sejam efetivamente registradas. Dessa forma, a informação estará disponível para aqueles que precisam dela, considerando um histórico que já aconteceu, e procurando melhorias. [10], [25]

3.4. Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA)

A FMEA é uma técnica sistemática focada na prevenção de falhas, da mesma forma foca-se também no projeto e/ou nos processos que são envolvidos na produção ou operação; por meio da abordagem de identificação, frequência e impactos dos diferentes modos de falha que possam se apresentar neles. [4], [5], [7]

A Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) é aplicada para cada sistema, subsistema, e componente identificado na definição de contorno; quer dizer tudo aquilo que será objeto da análise. Para cada função identificada, podem existir diferentes modos de falha, que podem ser causados por diferentes motivos. A FMEA aborda cada função do sistema (devido a cada falha, pois pode causar a perda da função, então são todas as falhas possíveis) e os modos de falha dominante associados a cada uma delas, e depois examina as consequências da falha que possa acontecer. [12]

As análises dos processos podem ser realizadas tanto em ordem ascendente (de baixo para cima) quanto iniciadas pela identificação dos modos de falha no nível mais baixo do sistema, considerando seus efeitos em níveis mais elevados, e dessa forma chegar ao nível mais alto. Porém, outra forma de realização da análise é chamada

descendente (de cima para baixo), com uma análise de falhas potenciais que afetam o sistema final, identificando a causa destas falhas no nível mais baixo do sistema. [5], [7]

Embora existam diferentes modos de falha, muitas vezes os efeitos podem ser os mesmos ou muito semelhantes na natureza. E assim, do ponto de vista do funcionamento do sistema, se uma falha de um componente acontecer, ela pode conseqüentemente originar a falha do sistema todo, considerando as ligações que os componentes têm entre ele. [6], [12]

Da mesma forma, os sistemas de máquinas similares possuem geralmente os mesmos modos de falha, mas a frequência deles pode mudar dependendo do entorno e das condições de trabalho, entre outros fatores. Assim, o uso que seja feito do sistema determinará as conseqüências das falhas. Por exemplo, os modos de falha dos pistões de um motor marítimo são os mesmos independentemente do motor que seja parte da análise. No entanto, o modo de falha dominante geralmente muda de uma máquina para outra, por conta das diferentes causas de falha, e assim, os efeitos da falha também serão distintos. [4], [5], [12]

Na Tabela 3.1 se mostra um exemplo da tabela da FMEA, onde se consideram os seus itens principais. É importante mencionar que a análise FMEA é qualitativa, e que os fatores considerados, tanto a severidade como a detectabilidade não são medidos quantitativamente.[16]

3.4.1. Processos da Análise de Modos e Efeitos de Falhas

A análise deve começar como uma integração das partes desde o início do projeto até a operação do sistema, considerando sempre que deve ser atualizada para conferir as mudanças que foram realizadas. Essa ferramenta deve ser usada para uma avaliação de itens de elevado risco e atividades contínuas para fornecer ações corretivas. [4], [5], [7], [16]

A FMEA deve ser usada também para definir considerações especiais nos testes, pontos de inspeção de qualidade, ações de manutenção preventiva, restrições operacionais, tempo de vida, e da mesma forma qualquer outra informação que seja de grande importância, além de atividades necessárias para minimizar o risco de falhar.[4], [5], [7], [16]

Ao final da análise, as ações que foram recomendadas devem ser incluídas considerando uma avaliação da disponibilidade para uma adequada implantação ou

justificativa documentada para toda a ação. Salvo se tenha outras especificações, os seguintes passos serão considerados para o desenvolvimento da FMEA. Na Figura 3.4 se apresentam os processos da FMEA.[12], [16], [28]

Tabela 3.1 – Formatação da tabela da Análise de Modos e Efeitos de Falhas. [4]

Elemento	Função	Modo de Falha	Causa	Consequência	Deteção	Plano de manutenção
Linhas de transmissão	Transporte elétrico	Contato de dois linhas	Força eletrodinâmica do vento	Quebra da linha	Visual	- Ação corretiva: Se a falha for menor. - Ação preventiva sistemática de manutenção. - Um novo estudo, utilizando cabos do mesmo material (substituição)
Isolador	Isolamento	- Envelhecimento - Escorvamento	- Descarga parcial ou total do arco em seu volume. - Superfície da serpentina de sobretensão (relâmpago) por um arco elétrico. - Poluição do ar (deposição de uma camada de poluição na superfície do isolador, camada molhante progressiva de poluição, desenvolvimento de terras secas e aparência de arcos parciais. - Extensão de arcos parciais se as condições forem favoráveis ao isolador empoeirado ambientes próximos do deserto ou salgados)	- Perfuração	Visual	- Ação corretiva: Eles podem ser cobertos com graxa ou lavados regularmente. - Ação preventiva sistemática de manutenção. - Um novo estudo, utilizando isolador composto (substituição)
Barramento	Seleção de linhas	Curto circuito	- O relâmpago - Manobra de equipamento - Falha de isolamento	- Deformação	Visual	- Ação preventiva sistemática de manutenção.
Detentor	Proteção	Interrupções longas e curtas		Colepso dos materiais	Visual	Manutenção corretiva - Para manter os protetores de relâmpagos
Disjuntor	Proteção e controle	Sobre tensão	- Alimentação da rede - Restabelecimento - Falhas Internas - Fontes de permutação	- Parada do equipamento - Parada da instalação - Perda de produção - Distúrbio Eletrônica de Potência Fusão	- Ruído - Visual - Calor	- Ação preventiva sistemática de manutenção. - Novo estudo (Melhoria). - Edição do sistema de arquitetura. - Controle do isolamento padrão dos eletrodos de aterramento - Escolha do nível de isolamento
Fusíveis	Proteção	Sobre corrente			Visual	Substituição
Seccionadores	- Isolador galvânico - Separação eléctrica	- Encerramento difícil ou - Abertura difícil	- Alimentação da rede - Restabelecimento - Falhas Internas - Fontes de permutação	Bloqueio	-Visual	- Aspire a poeira e limpe todas as peças acessíveis, em seguida, soprar o transformador para o nitrogênio ou ar seco. - Substituição

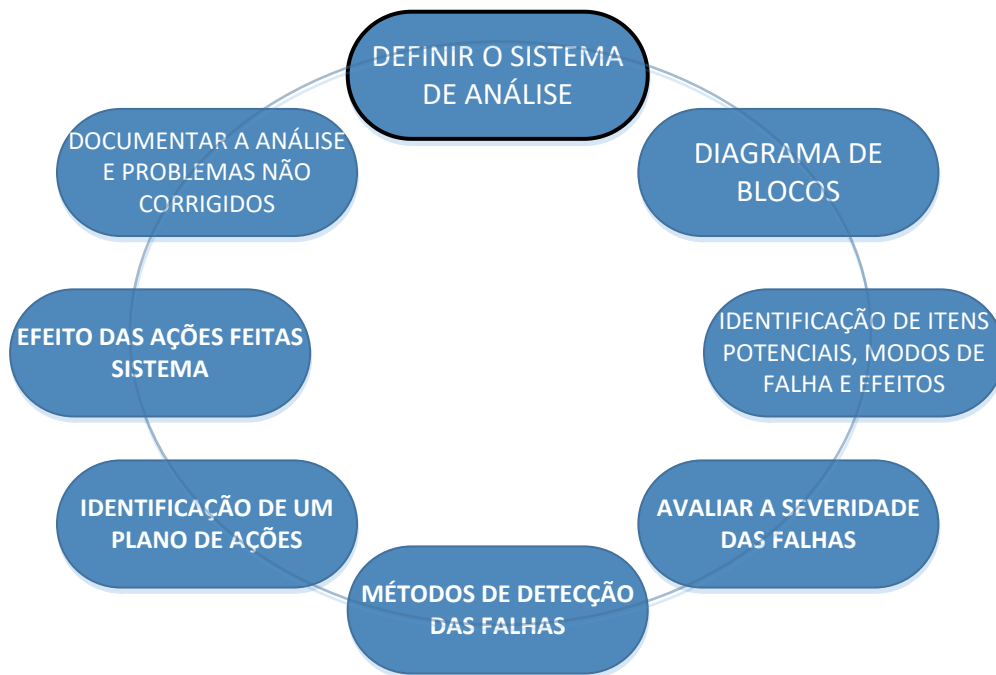


Figura 3.4 – Processo da FMEA [12]

- a) Definir o sistema de análise: O sistema que será objeto de estudo, envolve a identificação de funções internas e interface, o desempenho esperado em todos e cada um dos níveis dos relatórios, restrições do sistema e falhas na configuração. A informação das funções do sistema deve incluir descrições de cada missão, de forma que seja possível identificar as tarefas a serem desenvolvidas para cada missão, fase e modo de operação. A informação deveria descrever os perfis do meio ambiente, tempo esperado da missão e o uso do equipamento, e as funções além dos outputs de cada uma delas.
- b) Diagrama de blocos: A funcionalidade do diagrama de blocos envolve a confiabilidade e conseqüentemente a operação do sistema, pois considera as inter-relações e interdependências funcionais que existem entre os componentes. Com isso é possível construir o diagrama para cada configuração com as ligações que o sistema requer.
- c) Identificação de itens potenciais, modos de falhas e efeitos: Nessa parte são considerados os equipamentos que imediatamente geram uma perda na funcionalidade do sistema e impedem que a missão seja cumprida.
- d) Avaliar a severidade das falhas: Considerando sempre o pior caso, ou seja, em função das conseqüências mais potenciais de uma falha, e atribuída uma categoria de severidade.

- e) Métodos de detecção de falhas: é aplicado para cada componente e cada modo de falha, dependendo da equipe de operação e manutenção, para determinar as formas possíveis de identificar uma falha com antecipação.
- f) Identificação de um plano de ações: Serão necessárias ações corretivas ou qualquer outra atividade que seja necessária para impedir as possíveis falhas ou reduzir os riscos de elas acontecerem.
- g) Identificação dos efeitos das ações: Quando as ações corretivas já foram realizadas no sistema e aplicadas adequadamente, é importante conhecer qual foi o impacto nas funções do sistema, assim como as exigências para o suporte logístico.
- h) Documentar a análise e problemas não corrigidos: Esta etapa é muito importante, pois, quando mais adiante precisarem realizar outra FMEA, já existirá um registro das atividades que foram efetuadas, os problemas que surgiram e como foram resolvidas, além de problemas que não foram resolvidos, dessa forma, o pessoal técnico terá uma ideia melhor de como começar e onde focar a atenção quando uma possível falha vier a ocorrer.

3.4.2. Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falhas (FMECA)

Também conhecido como Análise de Criticidade. A FMECA, é uma extensão da análise FMEA, mas a diferença é que, enquanto a FMEA é uma análise qualitativa propriamente dita, a FMECA é uma análise quantitativa do risco da FMEA, isso quer dizer que os fatores que a FMEA considera para o seu desenvolvimento são quantificados com valores estabelecidos pela equipe de trabalho, e que envolve três fatores de medição, que são, Severidade (S), Ocorrência (O) e Detectabilidade (D). [3], [17], [29]. Este último fator considerado, Detectabilidade (D), foi recentemente adicionado à análise, pois, anteriormente em outras referências, se consideravam unicamente dois deles (severidade e ocorrência ou frequência) [8], [9] ou inclusive, se baseavam só em um deles, principalmente a frequência. [10]

Para conseguir aquela quantificação da criticidade, foi implantado o Número de Prioridade de Risco (RPN), ou também conhecido como Criticidade (C), que classifica o nível de criticidade para cada componente de um equipamento, estabelecendo a prioridade das tarefas de manutenção, levando em conta esses três fatores que foram mencionados. Paralelamente, é possível estabelecer limites de aceitação para aquele valor do RPN, considerando as exigências de operação dos equipamentos, porém, esses limites

podem mudar contanto que a manutenção alcance melhoras. Para o cálculo do RPN, é usada a seguinte fórmula:[1], [3]–[5], [17], [18]

$$RPN = S \times O \times D \quad (3.1)$$

Onde:

A severidade (S) representa a importância que um componente possui dentro do sistema, e como ele afeta a operação da máquina, se falhar. Os níveis de classificação variam entre 1 e 4, com base na falha causada pelos efeitos em termos de: [1], [4], [5], [7], [30]

- Tempo de resposta;
- Segurança de pessoas e bens;
- Qualidade da fonte de alimentação.

Tabela 3.2 – Classificação da Severidade [30]

Valor	Descrição	Critério
1	Desconhecido	A severidade da falha não foi registrada ou não pôde ser deduzida
2	Incipiente	A falha que não causa imediatamente uma perda da funcionalidade do sistema na produção, mas se ele não for analisado, pode mudar para uma falha crítica ou degradada no futuro.
3	Degradado	A falha que não é crítica, mas produz impedimento no correto funcionamento do sistema. Aquela falha pode usualmente, mas não necessariamente, mudar gradualmente até chegar a ser crítica.
4	Critico	A falha que produz imediatamente uma perda completa da funcionalidade do sistema e na produção.

A ocorrência (O) representa a probabilidade de falha de um componente em um sistema, também é considerada a frequência de uma falha que pode ser entendida como falha potencial. É importante mencionar que há uma diferença entre frequência de falha e probabilidade de falha: a frequência quer dizer o número de vezes por unidade de tempo que a falha ocorre, e a probabilidade de falha indica a certeza que se tem de que uma falha

vai acontecer num período de tempo. Os níveis de classificação variam entre 1 e 5, considerando o critério baseado na probabilidade de ocorrência (Poc), como se mostra na Tabela 3.3. [1], [4], [5], [7], [30]

Tabela 3.3 – Classificação da Ocorrência [16]

Valor	Descrição	Critério
1	Nível E (Extremadamente improvável)	$0,001 < Poc$
2	Nível D (Remoto)	$0,001 < Poc < 0,01$
3	Nível C (Ocasional)	$0,01 < Poc < 0,10$
4	Nível B (Razoavelmente provável)	$0,10 < Poc < 0,20$
5	Nível A (Frequente)	$0,20 < Poc$

A ocorrência não só será para considerar probabilidade de falha, mas também para estabelecer limites de aceitabilidade, tanto para os componentes quanto para o sistema. Da mesma forma, permitirá estabelecer o tempo em que deve ser feita a manutenção do sistema e que conseqüentemente irá determinar a política de manutenção mais adequada.[1]

Para a dita análise do tempo de manutenção do sistema, é usada a confiabilidade do mesmo, considerando também a confiabilidade de cada componente. Então, os limites serão baseados na confiabilidade, segundo dois conceitos: limite de operação (L_o) e limite de segurança (L_s), da seguinte forma:[1]

$$L_{OP} = 0,9 \rightarrow \text{Limite de operação}$$

$$L_{SEG} = 0,8 \rightarrow \text{Limite de segurança}$$

Tabela 3.4 – Resposta de avaliação da confiabilidade do sistema. [1]

Estado	Resposta avaliação
n : número de componentes $R_{sist} \geq L_{SEG}$ $R_i < L_{SEG}, i=1, 2, \dots, (n-1)$	Se medidas imediatas para reparar não forem tomadas, os componentes redundantes podem garantir a confiabilidade do sistema, pois atendem aos requisitos de segurança
$R_i \geq L_{SEG}, i=1, 2, \dots, n$ $R_{sist} < L_{SEG}$ $R_i < L_{SEG}, i=1, 2, \dots, (n-1)$ $R_{sist} < L_{SEG}$	Para garantir a segurança de ITS, manutenção correspondente deve ocorrer imediatamente.

A detectabilidade (D) representa a dificuldade que se tem para a detecção das falhas, considerando todas as técnicas de detecção usadas pela equipe técnica.

Obviamente, cada empresa terá diferentes métodos de detecção, que dependerão do setor e máquinas que serão analisadas, e conseqüentemente os níveis podem variar. Os níveis de classificação variam entre 1 e 10, como se mostra na Tabela 3.5: [1], [4], [5]

Tabela 3.5 – Classificação de Detectabilidade [4]

Valor	Critério	Nível de Detectabilidade (D)
1	Ação corretiva imediata	Detecção em todo momento
2	Imediata	Detecção confiável
3	Fácil	
4	Tarde	Possível detecção
5	Baixa	
6	Ocasional	Detecção Randômica (Improvável)
7	Não seguro	
8	Muito tarde	Difícil de detectar
9	Muito difícil	
10	Impossível	Não detectável

Além de ter as respostas de avaliação, é imperativo que para manter a confiabilidade do sistema em ótimas condições o valor não pode ser menor que o limite de operação (L_{OP}), sendo esse tempo adequado para realizar a manutenção e fazer a avaliação correspondente de todo o sistema e dos seus componentes.

A partir desses índices, podemos calcular o valor da criticidade, além disso é possível priorizar as falhas baseadas no RPN e identificar aquelas cujo nível de criticidade não esteja dentro dos limites permissíveis para um adequado desempenho.[1], [4], [5]

3.4.3. Avaliação da Criticidade e Política de Manutenção

Nessa etapa usaremos os resultados obtidos pelo cálculo do RPN, pois com aqueles valores, podemos classificar a criticidade, baseada em níveis de aceitação, que dependendo da máquina ou entorno de trabalho, mudará para cada situação quando for necessário.[4], [5]

A Tabela 3.6 mostra valores que são usados na avaliação de um sistema de distribuição de energia, portanto os níveis que aparecem são relativos nesse caso, considerando as condições de operação ótimas para aquele trabalho.[4]

Tabela 3.6 – Níveis de Criticidade de um Sistema de Distribuição de Energia.[4]

Criticidade (C)		Risco ou Perigo
Nível de Criticidade	Valor	
Menor	1 – 30	Aceitável
Médio	31 – 60	Tolerável
Alto	61 – 180	Inaceitável
Muito alto	181 – 252	
Crítico	253 – 324	
Muito crítico	> 324	

Independentemente do nível de criticidade que se obteve na análise, é importante mencionar que para estabelecer uma política de manutenção baseada naqueles valores, são necessários os limites de *operação* e *crítico*, que são usados como indicadores do tipo de manutenção (política de manutenção) que deve ser realizada.[4], [5]

A Tabela 3.7 mostra os dois limites de Criticidade (C), mas os valores que se estabelecem são para uma Sistema de Distribuição de Energia. Os limites são valores positivos menores que um ($R=0,540$ e $S=0,999$), pois os critérios que foram usados para definir os níveis de Severidade, Ocorrência e Detectabilidade foram diferentes.[5]

Tabela 3.7 – Política de Manutenção de um Sistema de Distribuição de Energia.[5]

Condição imposta	Consequência	Política de Manutenção
$C < R$	Sem problema, nada que reportar	Manutenção corretiva
$R < C < S$	Aceitável, mas!	Vigilância especial preventiva / manutenção preditiva
$S < C$	Completo questionamento do estudo.	– Ação de manutenção preventiva sistemática – Novo estudo benéfico.

3.5. Engenharia de Confiabilidade

Nesta etapa se desenvolverão os modelos probabilísticos que se usarão para realizar a análise dos dados que serão a base dos cálculos. A comparação dos modelos se realizará no próximo capítulo, e os resultados permitirão obter a melhor decisão sobre a política de manutenção.

3.5.1. Distribuição de Probabilidades

A base principal aqui é a teoria de probabilidades, e para tal é necessário o uso de uma distribuição de probabilidade para os dados que desejamos analisar.

É importante mencionar que existem dois tipos de distribuições de probabilidades; distribuição de probabilidade de uma variável discreta e a distribuição de probabilidade de uma variável contínua, e cada uma possui dentro de si outros subtipos de distribuição. No presente trabalho, será usada a última mencionada, e a variável contínua usada será o tempo, o qual é obtido do histórico de falhas e reparos.[31], [32]

Como um conceito geral de distribuições de probabilidade de variável contínua, tem-se a variável aleatória X , a função de densidade de probabilidade, é tal que:[32]

$$f(x) \geq 0 \quad (3.2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (3.3)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (3.4)$$

A área sob $f(x)$ de “a” até “b”, para todo valor de a e b, é mostrada na Figura 3.5.

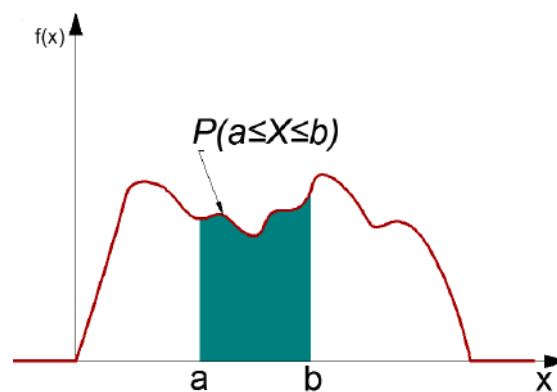


Figura 3.5 – Probabilidade determinada pela área sob a curva

A média ou valor esperado de X , é denotado como μ ou $E(X)$, com a seguinte expressão:

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (3.5)$$

A variância de X , denotada como $V(X)$ ou σ^2 , com a seguinte expressão:

$$\sigma^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2 \quad (3.6)$$

O desvio padrão de X é $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Embora se conheça a função de densidade de probabilidade, $f(x)$, é importante mencionar que a representação da probabilidade é a função de probabilidade acumulada, também conhecida como função de probabilidade, $F(x)$. [31]–[33]

3.5.2. Atributos de confiabilidade

Nesta etapa se dará um conceito fundamental dos atributos de confiabilidade, os quais serão objeto da análise ao longo do tempo. Os atributos que serão considerados são: a confiabilidade, $R(t)$, taxa de falha $\lambda(t)$ e tempo médio entre falhas (MTBF). [33]

a. Confiabilidade

Para a nossa análise, a variável aleatória será o tempo t para falhar, assim a confiabilidade, representada por $R(t)$, será a probabilidade de um componente, máquina ou sistema sobreviver em um intervalo de tempo t . [33]

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T < t) \quad (3.7)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (3.8)$$

b. Taxa de falha

Um termo que é introduzido é o conceito da taxa de falha que nos permite (no princípio) calcular a confiabilidade pois indica quais itens têm mais probabilidade de falhar com o tempo, geralmente é representada por $\lambda(t)$.

Com os conceitos que se tem é possível estabelecer uma relação entre a confiabilidade e a função de probabilidade de falha, que é a seguinte: [33]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (3.9)$$

Consequentemente, a partir do conceito da taxa de falha se tem que $\lambda(t)dt$ é aproximadamente a probabilidade do item falhar entre um tempo t e $t+dt$, dado que estava funcionando em t . [32], [33]

c. Tempo médio para falhar

O tempo médio para falhar, ou também conhecido como MTTF, seja o parâmetro mais usado por ser o mais característico de confiabilidade. O MTTF é apenas o valor esperado ou o valor médio $E(t)$ dos tempos de falha. [33]

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (3.10)$$

d. Tempo médio para reparo

Considerando que a função de manutenibilidade já está definida, da mesma forma que o tempo médio para falhar é um indicativo de confiabilidade, obtido pela média da função de confiabilidade. Assim, o tempo médio para reparo será o valor médio da função de manutenibilidade. A fórmula é a seguinte:[33]

$$MTTR = \int_0^{\infty} tm(t)dt \quad (3.11)$$

Para a nossa análise, serão usados dois tipos de distribuição de probabilidade, distribuição exponencial e distribuição de Weibull. Em seguida, se apresentam as formulações básicas de duas distribuições de probabilidade: [31], [32]

i. Distribuição exponencial

A distribuição exponencial possui as seguintes formulações:[32], [33]

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.12)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.13)$$

$$MTTF = E(t) = \mu = \frac{1}{\lambda} \quad (3.14)$$

$$V^2 = \sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (3.15)$$

Nesse caso " λ ", é uma constante pré-processada para o cálculo dos demais atributos de confiabilidade.

ii. Distribuição de Weibull

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} \quad (3.16)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} \quad (3.17)$$

$$\lambda = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} \quad (3.18)$$

onde m é o parâmetro de forma, e θ é o de escala, também conhecido como vida característica.

$$MTTF = E(t) = \mu = \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (3.19)$$

$$V^2 = \sigma^2 = \theta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \theta^2 \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)\right)^2 \quad (3.20)$$

onde $\Gamma(x)$ é a função gama.

3.5.3. Confiabilidade de sistemas

O interesse principal é no cálculo da confiabilidade de um sistema, constituído por um arranjo de componentes (representado em diagrama de blocos), os quais estão conectados segundo regras pré-estabelecidas. É lógico que cada sistema vai ter um arranjo diferente do outro, considerando que os arranjos podem ser um sistema em série e um sistema em paralelo. [33], [34]

3.5.3.1. Sistema em Série

O sistema em série é o primeiro arranjo que será analisado. Para estabelecer o conceito geral, consideraremos que nosso sistema em série é composto por n componentes, como se mostra na Figura 3.6. É importante mencionar que se um componente falhar, o sistema completo vai falhar. [33], [34]



Figura 3.6 – Sistema em série

A confiabilidade do sistema em série será representada por R_S , determinado pela seguinte fórmula: [33], [34]

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.21)$$

3.5.3.2. Sistema em Paralelo

Vamos considerar nesse caso que nosso sistema é composto por n componentes em paralelo. É assumido que se um componente falhar, não afeta o funcionamento dos outros componentes. [33], [34]

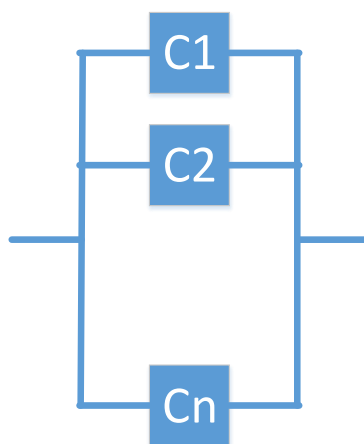


Figura 3.7 – Sistema em paralelo

A confiabilidade do sistema em paralelo, será representada por R_p , determinado pela seguinte fórmula: [33], [34]

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (3.22)$$

Geralmente na vida real, as máquinas possuem a mistura desses dois tipos de sistemas.

3.5.4. Decomposição pivotal

Existem situações em que o cálculo da confiabilidade se torna complicado, assim que a decomposição pivotal nos permitirá agilizar essas operações considerando um componente como pivô. Depois o cálculo será feito pela soma de duas condições, quando o pivô está bom e quando o pivô está falho, assim a formulação é da seguinte forma. [33]

$$R_{sist} = R_{sist/(pivô\ OK)} \times R_{pivô} + R_{sist/(pivô\ falho)} \times \overline{R_{pivô}} \quad (3.23)$$

3.5.5. Análise de Markov

Para iniciar com a análise de Markov, devemos começar com a identificação de todos os possíveis estados do sistema. Um estado se define particularmente como a combinação de operação e falha dos componentes. Assim, em nosso arranjo do sistema, a interação de falhas dependentes e a consideração dos reparos dos componentes são a base para o cálculo de nosso processo. [33], [34]

Para conhecer o número de estados totais do sistema, que em nosso caso apenas apresenta dois estados (falha, operação), a fórmula é simplesmente 2^n , onde n , representa o número de componentes do sistema. É importante mencionar que se deve conhecer quais estados são possíveis, pois a representação deles será feito com diagrama de blocos, e mediante essa análise pode-se calcular os atributos de confiabilidade. Quanto mais

complexo seja o sistema a ser analisado, será mais complicado estabelecer o diagrama de blocos daquele sistema. [33], [34]

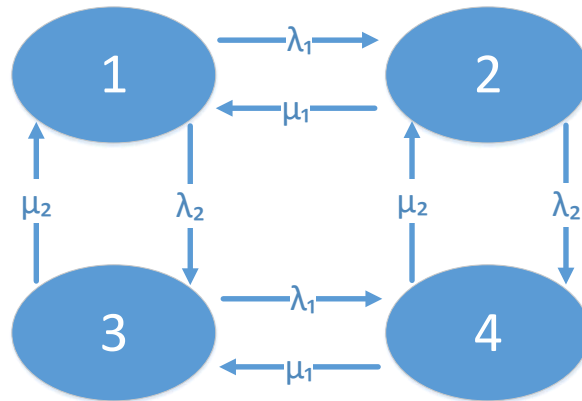


Figura 3.8 – Diagrama de estados de dois componentes

Para estabelecer as equações do modelo de Markov, é necessário saber que a transição de um estado para outro é feita com uma taxa constante, com distribuição exponencial e considerando que apenas um componente pode mudar de estado em cada transição. [33], [34]

O processo geral de Markov assume probabilidades condicionais dos eventos. Se t =tempo e x =incremento de tempo, a transição de i a j pode se generalizar como:[3], [5]

$$p_{i,j}(t+x) = \sum p_{ik}(t)p_{kj}(x) \quad (3.24)$$

$$\sum p_{ij}(x) \leq 1, \text{ para todo } i \text{ e } j \quad (3.25)$$

A probabilidade de estar num estado específico depois de n passos de tempo é expressa como:

$$P^{(n)} = P(0)P^n \quad (3.26)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P^{(n)} = \alpha \quad (3.27)$$

$$\alpha P = \alpha \quad (3.28)$$

Onde $P(0)$ é o valor do vetor de probabilidade dos estados no estado inicial $[P_1^0 P_2^0 P_3^0 P_4^0]$, e α é o valor do vetor da probabilidade que se deseja obter. Para a Figura 3.8, o vetor α seria $[P_1 P_2 P_3 P_4]$, e para a análise em estado estacionário onde se considera um período longo de tempo, e não tem mudanças no sistema, tem-se que: [3], [5]

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \quad (3.29)$$

Para a Figura 3.8, as equações para esse sistema de quatro componentes serão as seguintes:

$$D = \begin{bmatrix} -(\lambda_C + \lambda_B) & \lambda_C & \lambda_B & 0 \\ \mu_C & -(\mu_C + \lambda_B) & 0 & \lambda_B \\ \mu_B & 0 & -(\mu_B + \lambda_C) & \lambda_C \\ 0 & \mu_B & \mu_C & -(\mu_C + \mu_B) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Onde D, é a matriz de transição de estados e as equações 3.34 e 3.32 são as que permitem sua solução.

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_C + \lambda_B)p_1 + \mu_C p_2 + \mu_B p_3 = 0 \\ \lambda_C p_1 - (\mu_C + \lambda_B)p_2 + \mu_B p_4 = 0 \\ \lambda_B p_1 - (\mu_B + \lambda_C)p_3 + \mu_C p_4 = 0 \\ \lambda_B p_2 + \lambda_C p_3 - (\mu_C + \mu_B)p_4 = 0 \end{array} \right\} \quad (3.31)$$

$$p_1 = \frac{\mu_C \mu_B}{(\lambda_C + \mu_C)(\lambda_B + \mu_B)} \quad (3.32)$$

$$p_2 = \frac{\lambda_C \mu_B}{(\lambda_C + \mu_C)(\lambda_B + \mu_B)} \quad (3.33)$$

$$p_3 = \frac{\lambda_B \mu_C}{(\lambda_C + \mu_C)(\lambda_B + \mu_B)} \quad (3.34)$$

$$p_4 = \frac{\lambda_C \lambda_B}{(\lambda_C + \mu_C)(\lambda_B + \mu_B)} \quad (3.35)$$

Cada valor de p_i , representa uma condição diferente. A primeira condição (p_1), representa quando ambos componentes estão funcionando, na segunda condição (p_2), representa que o primeiro componente está funcionando e o segundo está falho, a terceira condição (p_3), representa que o primeiro componentes está falho e o segundo, funcionando. Por último a última condição (p_4), representa quando ambos componentes estão falhos. É importante mencionar que quanto mais componentes possua o sistema, este terá mais estados, portanto cada condição representará um estado dos componentes. [2], [4]

3.5.4.1. Análise de Markov para sistemas complexos

Uma análise de Markov de um sistema complexo pode se trabalhar de forma simples considerando que a vantagem é que possui distribuição de probabilidade exponencial. É assim que é possível fazer aproximações para calcular valores de nosso interesse, que para esse trabalho seria a disponibilidade, taxa de falha e MTBF. As formulações que se mostram em seguida serão para componentes redundantes e não-redundantes [6]

a. Componentes não redundantes

Os valores dos atributos de confiabilidade de componentes não redundantes estão dados pelas seguintes formulações. [6]

$$\lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.36)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_n} \quad (3.37)$$

Onde n é número de componentes não redundantes ligados e λ_i , é o valor da taxa de falha de cada componente.

b. Componentes redundantes

Os valores dos atributos de confiabilidade de componentes redundantes estão dados pelas seguintes formulações. [5]

$$\lambda_n \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\mu_i}\right) \times \prod_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.38)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_n} \quad (3.39)$$

Onde n é número de componentes redundantes ligados, λ_i é o valor da taxa de falha de cada componente e μ_i é o valor da taxa de reparo de cada componente.

Para o cálculo da disponibilidade, é necessário saber os estados do sistema para determinar quais são as condições que permitem o funcionamento adequado.

Os métodos estocásticos desenvolvidos (método de Diagrama de Blocos e análise de Markov) na dissertação foram utilizados porque a informação que se tem é coletada anteriormente, então quer dizer que possuem um histórico (portanto possuem resultado objetivo) das máquinas que depois serão objeto de análise e que servirá para realizar uma representação no domínio do tempo. Por outro lado, existe outro tipo de análise que é importante mencionar, que é a análise bayesiana cuja base é incorporar resultados de pesquisas anteriores ou utilizar experiência de pessoas que estão mais envolvidas no campo, essa metodologia é geralmente usada para equipamentos que são novos e não se tem algum registro que permita estabelecer uma política de manutenção ou análise de falha até pelo menos depois de um tempo de avaliação, então depois daquele tempo seria melhor trocar a análise bayesiana (que não possui uma boa representação no domínio do tempo) por alguma das que foram mencionadas na dissertação.[34]

4. Metodologia de cálculo implantado no Software

4.1. Esquema de trabalho

Como foi mencionado, o objetivo desse trabalho é que, a partir de dados limitados, se consiga modelar, com um programa feito em LabVIEW, uma análise de confiabilidade, usando como dados de entrada parâmetros probabilísticos que já foram obtidos com uma análise prévia com o histórico de reparos e/ou falhas. É importante mencionar que a Análise de Modo, Efeito e Criticidade de Falha (FMECA), significa que foram analisados os reparos, então, foi possível identificar os parâmetros necessários para esse tipo de análise.

A Figura 4.1, mostra o diagrama de fluxo para o processo de cálculo deste trabalho.

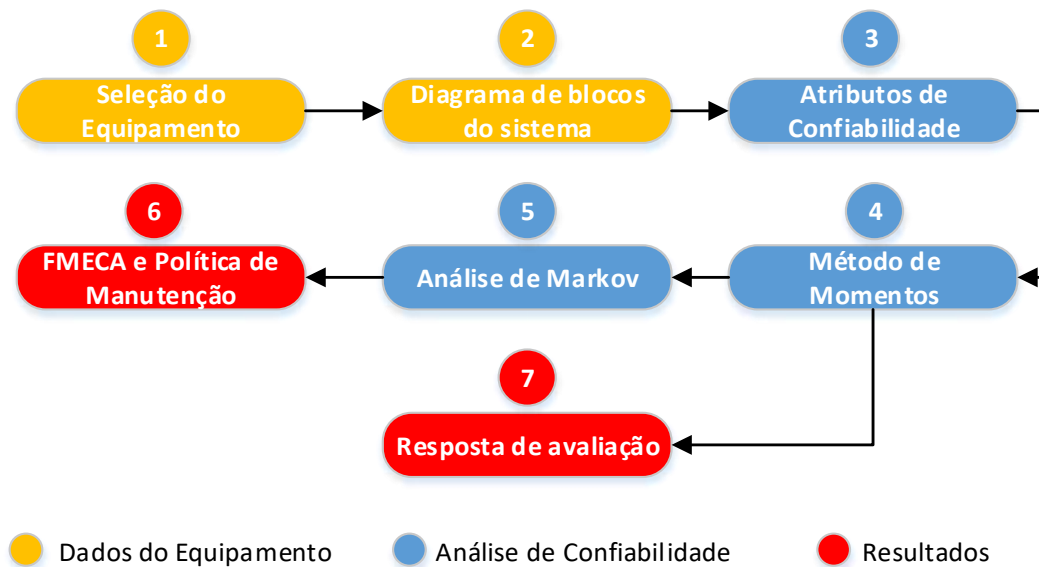


Figura 4.1 – Diagrama de fluxo do processo de cálculo

O diagrama de fluxo está dividido em três passos principais, os quais são: dados do equipamento, diagrama de bloco e resultados. Além disso, cada etapa está subdividida em outras etapas, sendo no total seis, as quais explicam sequencialmente o procedimento de cálculo.

a) Dados do equipamento

a.1) Seleção do equipamento

Como primeiro passo é a seleção do equipamento onde devemos identificar qual será o objeto de análise, considerando os dados que serão necessários mais à frente no processo.

a.2) Diagrama de blocos do sistema

Uma parte fundamental da análise, é conhecer exatamente as ligações que possuem os componentes para, dessa maneira, poder estabelecer dependências entre eles que podem causar mudanças nos resultados.

b) Análise de confiabilidade

b.1) Atributos de confiabilidade

Os atributos de confiabilidade que serão desenvolvidos, foram mencionados no Capítulo 3. Com os dados de entrada fornecidos, teremos duas opções para nossa análise, que dependerá se tivermos apenas os parâmetros de falhas ou quando tivermos os parâmetros de falhas e reparos. Baseado nisso, se procede com o método de diagrama de blocos ou de Markov.

b.2) Método de Diagrama de Blocos

Para o método de diagrama de blocos é necessário o diagrama de blocos e dos parâmetros de falha, que dependendo do tipo de distribuição que foi determinada, mudará para cada caso. Para nossa análise, usaremos dois tipos de distribuições, tanto a exponencial quanto a Weibull.

Nessa etapa, também se dará um diagnóstico inicial do tempo da seguinte manutenção, baseado em limites de operação e segurança de todo o sistema e cada componente. Será modelado também o comportamento do sistema através de um tempo de avaliação estabelecido, que mostrará num gráfico a confiabilidade de cada componente e do sistema completo.

b.3) Análise de Markov

Além da taxa de falha, o fator necessário para essa análise é a taxa de reparo, pois com ela será possível determinar os estados do sistema, conhecendo as mudanças devido ao reparo. Por isso, essa análise será realizada unicamente quando se tiver a taxa de reparo além dos outros parâmetros já mencionado no método de diagrama de blocos. A partir dos dados de entrada, se estabelece uma matriz de estados, e será analisada a condição de estado estacionário.

c) Resultados

c.1) FMECA e Política de Manutenção

Na etapa de resultados, será apresentada a Análise de Modo, Efeito e Criticidade de Falha (FMECA) do equipamento considerando os detalhes necessários para a

identificação de modos de falha, causas, consequências, métodos de detecção e a política de manutenção que será estabelecida a partir do número de prioridade de risco (RPN) e os limites que foram pré-definidos para um desempenho ótimo. No entanto, a FMECA com todos os detalhes será mostrada apenas para equipamentos que possuam informação de reparos, pois significará que já têm um histórico do que foi feito e as metodologias de detecção e importância de cada componente dentro do sistema. É importante mencionar que para o cálculo do RPN, são necessários três fatores (Severidade, Detectabilidade e Ocorrência), sendo assim que os dois primeiros componentes são determinados pela experiência do pessoal responsável dos equipamentos, porém, a ocorrência será o resultado obtido pelo método de Diagrama de Blocos e a análise de Markov. Finalmente para obter o valor do RPN será necessário o tempo de diagnóstico, que terá que ser menor que o tempo de avaliação do comportamento da confiabilidade do sistema.

c.2) Resposta de avaliação

A resposta de avaliação é o resultado obtido unicamente pelo método de Diagrama de Blocos, que está limitado para componentes com apenas parâmetros de falha, mas não de reparo, nem dos detalhes de cada falha.

Para essa resposta de avaliação, se estabelecem dois limites fixos para assegurar a confiabilidade do equipamento. Os limites são de segurança e de operação e a resposta será baseada no valor da confiabilidade de cada componente e do sistema, segundo a Tabela 3.4, do mesmo jeito que para a FMECA, a resposta de avaliação precisa de um tempo de diagnóstico que permite saber o estado do sistema e as possíveis ações a serem efetuadas.

4.2. Desenvolvimento do software e avaliação

Para conseguir com sucesso nosso objetivo de simular falhas futuras, a partir de resultados que foram obtidos nas análises anteriores de aderência de distribuição, e estabelecer políticas de manutenção, usaremos o software LabVIEW (Figura 4.2) para modelar todo o sistema e os componentes, para analisar os resultados obtidos, devido à facilidade para programar e interação do usuário.

O LabVIEW, é um software que pertence à *National Instruments*, cujo sintaxe de programação é gráfica, com entorno de utilização de programas chamados de *Virtual Instruments* ou *VIs*, sendo muito prático a utilização deles, pois possui duas janelas principais, que são a parte da interface do usuário, que permite ter uma melhor visualização dos resultados dependendo das necessidades; a outra é o diagrama de blocos ou a plataforma de programação propriamente dita, onde se realizam as ligações necessárias para obter a lógica da programação. Para agilizar a programação, é necessário o uso de sub-rotinas que permitem reduzir programas ou rotinas que continuamente são usados durante toda a programação.



Figura 4.2 – Software LabVIEW 2016

Para o desenvolvimento do programa feito em LabVIEW, será necessário realizá-lo por fases, de acordo com o fluxograma da Figura 4.3, que está dividido em duas partes, que são: a Configuração e a Operação.

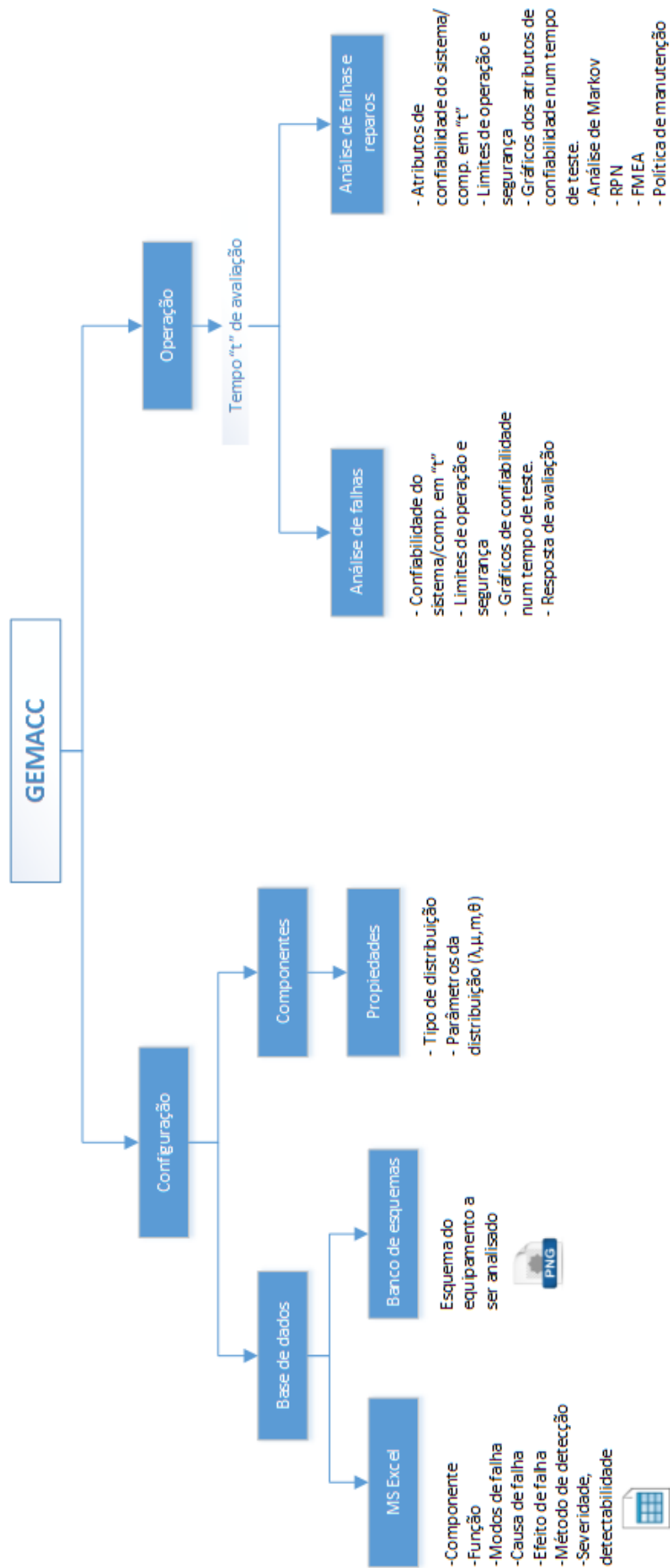


Figura 4.3 – Fluxograma de Processos do Programa GEMACC.

A parte de “Configuração” contém duas subdivisões, que são a Base de Dados, a qual se constitui pelos dados obtidos da planilha do Excel que foi previamente preenchida com as informações de falhas e reparos como, os componentes da máquina, a função dos componentes, os modos possíveis de falha, causas de falhas, efeitos de falha, métodos de detecção e dois fatores importantes que farão parte do cálculo do RPN (Número de Prioridade de Risco). O outro item é “Componentes”, onde se tem que editar as propriedades de cada componente, que inclui o tipo de distribuição, e dependendo do qual tenha sido escolhido, será possível adicionar os parâmetros que governam seu comportamento, como a taxa de falha (para distribuição exponencial), parâmetro de forma e parâmetro de escala (para distribuição de Weibull).

A parte de “Operação”, contém duas subdivisões assim como a “Configuração”, no entanto precisa de um dado de entrada para realizar os demais cálculos, pois mostrará os resultados, baseado no tempo de avaliação. Os resultados e gráficos obtidos dependerão muito do tipo de base de dados que serão analisados, podendo ser apenas falhas ou falhas e reparos.

4.3. Programa GEMACC

Para começar a descrição de cada função do programa, descreveremos o programa em si, com as limitações, vantagens e resultados que obteremos ao final de nossa análise.

O nome do programa é GEMACC cuja tela principal se mostra na Figura 4.4, e cujas siglas significam Gestão de Manutenção Centrado na Confiabilidade, é um programa feito em LabVIEW com as ferramentas necessárias para que o usuário possa interagir com facilidade e consiga obter resultados que possam ser de utilidade para obter um diagnóstico de falhas futuras e impedir manutenções desnecessárias, a partir de um padrão que será estabelecido a partir dos dados que se tem.

Segundo as referências [18], [19] já foram desenvolvidos outros programas (*Relax Reliability Studio 2007 V.2* e *XFMEA*) mas, realmente, essa questão da análise da confiabilidade não foi bem abordada, porque apresenta ao usuário apenas resultados do Número de Prioridade de Risco quando, na verdade, se precisa de mais indicadores que permitam uma melhor análise, em relação a como evolui o sistema e como afeta a falha de um componente no resultado final, por isso surge a necessidade de abordar aquele problema de maneira sistematizada através do software já mencionado, porém, como qualquer programa e/ou análise, nem sempre se conseguirá abordar todo o problema em

si. Portanto, para estabelecer o escopo do programa, se descreverão as limitações, os benefícios e linhas de ação a partir dos resultados.



Figura 4.4 – Tela principal do Software GEMACC

a) Benefícios

Embora se tenham limitações para a análise, é possível obter resultados que são de grande importância para o diagnóstico e estabelecimento de uma política de manutenção. Esses benefícios são os seguintes:

- O programa GEMACC é capaz de analisar dados, cujo teste de aderência já foi realizado, assim que já é possível saber se os dados seguem uma distribuição exponencial ou uma distribuição de Weibull, as quais serão as duas distribuições de probabilidade que serão implantadas neste trabalho.
- Quando se tem dados de falhas, o programa é capaz de realizar um diagnóstico prévio em um período de tempo desejado (tempo de diagnóstico), baseado na probabilidade de ocorrência, cujos resultados estão definidos por limites de operação e segurança que avaliam a confiabilidade do sistema resultante.
- Quando se tem dados de falhas e reparos, o programa se torna ainda mais eficiente, porque não só realiza um diagnóstico prévio, mas também estabelece uma política de manutenção.
- Para ambos os casos a análise é feita não apenas para um componente, mas também para o sistema completo considerando as dependências que existem entre cada componente que conseqüentemente afetam o desempenho do equipamento ou sistema. Então, isso quer dizer que a base da análise é realizada por componente

considerando todos os possíveis modos de falha que possa ter e não por cada tipo de falha, o que gera um modelo mais adequado e simplificado para analisar.

- Para ambos casos, o programa apresenta uma interface bem fácil de manipular com as ferramentas necessárias e códigos de cores que permitem uma melhor visualização dos resultados e indicadores de confiabilidade que se apresentam.
- É possível ver como evolui a confiabilidade do sistema e de cada componente dentro do gráfico de Tempo vs. Confiabilidade, através de um Tempo de Avaliação que seja dado.
- Permite saber se a operação de um sistema pode continuar depois de um tempo de trabalho, considerando que a confiabilidade está dentro dos limites de aceitabilidade para uma operação ótima e assim gerar mais ganho.
- Os resultados obtidos através do programa fornecem vários detalhes que ajudam para uma decisão adequada na hora de realizar uma manutenção, conseguindo assim resultados com mais informações que oferecem outros softwares (tempo para falhar, tempos limites de operação e segurança, variação da confiabilidade ao longo do tempo, RPN, atributos de confiabilidade e análise de todo o sistema e por componente), ademais esses resultados foram obtidos sem custo nenhum.

b) Limitações

Dentro das limitações têm-se as seguintes:

- Com certeza a dúvida cai sobre o leitor ao perceber que aparecem duas opções na tela principal, quando poderia ter sido apenas uma que envolvesse tanto falhas quanto os detalhes de manutenção, pois os dados que governam os resultados são os detalhes do histórico de falhas e reparos, de acordo com a Tabela 5.1, são aqueles que afetam diretamente o cálculo e que limitam a análise deles desde que foram adquiridos. Fabricantes e operadores se reservam o direito de não tornar públicos detalhes de projeto e relatos de falhas, pois os consideram informações confidenciais e estratégicas para seus negócios.
- Os tipos de distribuição que estão sendo usadas nas análises são apenas a distribuição de Weibull e exponencial, pois para determinar o tipo de distribuição mais adequada para um banco de dados, é necessário realizar um teste de aderência que permitirá decidir a distribuição que melhor se adequa ao histórico de falhas, porém, as distribuições referidas (Weibull e exponencial) são as mais comuns para simular

falhas de equipamentos, não obstante, isso não significa que não seja possível simular os dados com outro tipo de distribuição, pois existem muitos fatores que influem, como as condições de uso, ambiente de trabalho, tipos de máquinas, etc.

- Os dados que são analisados são de diferentes máquinas, que não necessariamente envolvem um equipamento naval, pois esses tipos de empresas possuem uma segurança dos seus dados ainda maior em relação a outros setores. No entanto, é importante mencionar que os outros equipamentos, são testados no programa para obter resultados que atinjam as necessidades de operação, as quais seriam obtidas de igual maneira para equipamentos navais se for possível obter mais informação que é necessária para nossa análise.
- Para realizar uma análise de um sistema novo, será necessário contar com o esquema do sistema, que deve incluir os componentes que possui e as ligações que existem entre eles, portanto os esquemas devem estar já disponíveis, da mesma forma que a programação, porque por enquanto não é possível editá-los a partir do programa, pois à medida que o sistema for maior, o modelo fica mais complicado de tratar computacionalmente. Mesmo que seja importante tratar as falhas da forma mais realista possível, é necessário obter um modelo que não seja inviável para analisar.
- Assim como mostra a Figura 5.3, haverá dois tipos de análises e conseqüentemente a análise e resultados serão diferentes para cada caso, sendo assim quando apenas se tem dados de falhas se obterá apenas um diagnóstico indicando se o equipamento precisa de alguma manutenção ou não. No entanto, quando se possuem os dados de falhas e reparos a análise muda, e obviamente os resultados, já que se conta com mais detalhes das falhas e como foram reparados. A Tabela 4.1 mostra uma planilha com os dados de entrada a serem preenchidos numa empresa para falhas e manutenções que se precisam para uma análise mais elaborada.

Tabela 4.1 – Planilha de base de dados de falhas e manutenções. [30]

	FALHAS		MANUTENÇÃO	
	Descrição	Formatação	Descrição	Formatação
Dados de identificação	Número de registro de falha	Numérico	Número de registro de manutenção	Numérico
	Nome do equipamento	Texto	Registro de data correspondente	Numérico
	Número da ordem de serviço	Numérico	Nome do equipamento	Texto
	Estado	Lista de código	Estado	Lista de códigos
Dados do evento	Data de detecção de falha	Data	Data da manutenção	Data
	Modo de falha	Lista de código	Categoria de manutenção	Lista de código
	Tipo de severidade	Lista de código	Subunidade manutenível	Lista de código
	Mecanismo de falha	Lista de código	Itens mantidos	Lista de código
	Causa de falha	Lista de código	Ações de manutenção	Lista de código
	Subunidade afetada	Lista de código	Intervalo de manutenção	Numérico
	Itens manuteníveis	Lista de código	(apenas para manutenção periódica)	
	Método detecção de falha	Lista de código	Horas-homem de manutenção, por cada ação e total	Numérico
	Consequência de falha	Lista de código	Tempo de manutenção ativa	Numérico
			Tempo de inatividade	Numérico
Informação adicional	Código de observações específicas	Lista de código	Código de observações específicas	Lista de código
	Informações adicionais sobre texto livre	Texto	Informações adicionais sobre texto livre	Texto

4.3.1. Implantação do módulo de Análise de Falhas

Para nossa primeira simulação, se considerará um Sistema de Navegação Inercial (SINS), que representa um sistema eletromecânico complexo, cujos parâmetros de falha são considerados por componente.

Ao iniciar o programa GEMACC (Figura 4.4) se seleciona a base de dados que se possui e que se vai analisar, que em nosso caso é “Análise de Falhas”. Depois aparecerá outra janela como se mostra na Figura 4.5, nesta janela será necessário selecionar o arquivo onde está o esquema do sistema que se deseja analisar, que no nosso caso será um Sistema de Navegação Inercial (SINS),

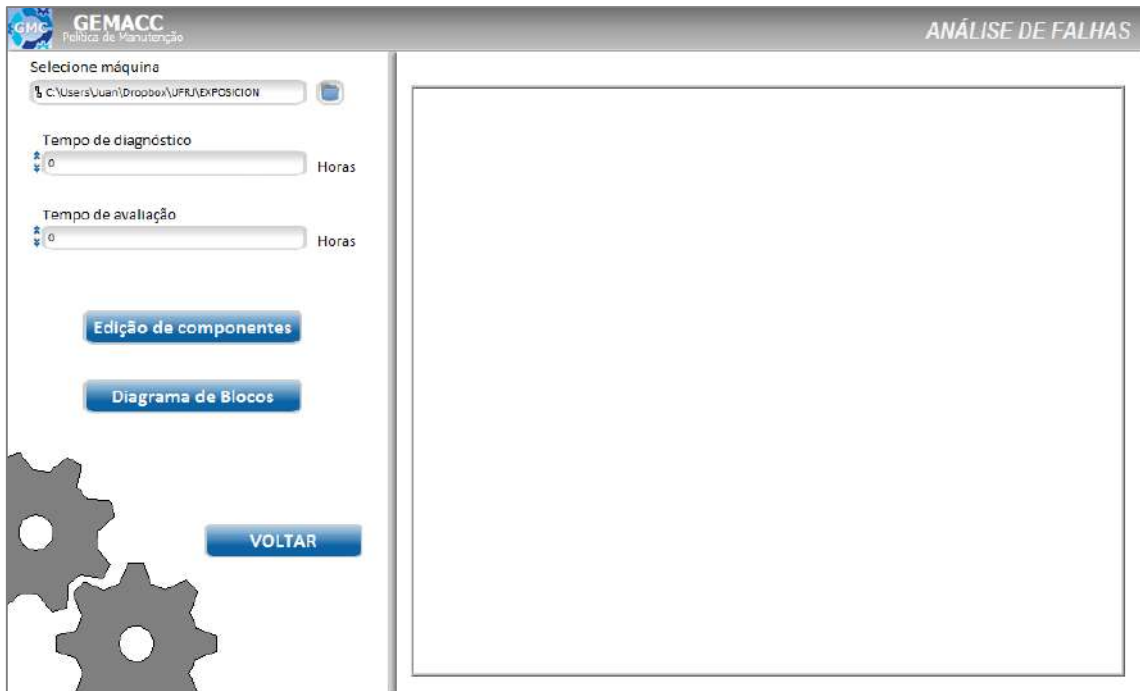


Figura 4.5 – Tela principal do módulo de Análise de Falhas

4.3.1.1. Sistema de Navegação Inercial (SINS)

Um sistema de navegação inercial representa um sistema eletromecânico complexo que calcula estimativas da posição, orientação e velocidade de um objeto em movimento sem referências externas; geralmente, é usado em cenários militares, como se mostra na Figura 4.6 onde se tem um sistema de navegação inercial naval.



Figura 4.6 – Diagrama simplificado de blocos do SINS

O SINS analisado é um esquema geral de um sistema desse tipo, que possui componentes redundantes, cujas falhas são tratadas por componentes e como sistema. É importante mencionar que o sistema analisado não é necessariamente naval pela confidencialidade de informação que esse setor possui, no entanto, o esquema é um modelo análogo que nos permitirá conhecer as respostas de nossa simulação. Em nossa

análise será usado a confiabilidade do sistema (série e paralelo), para facilitar a parte computacional, que no outro caso é bem mais complicado. O Sistema de Navegação Inercial possui os componentes que se mostram na Figura 4.7.

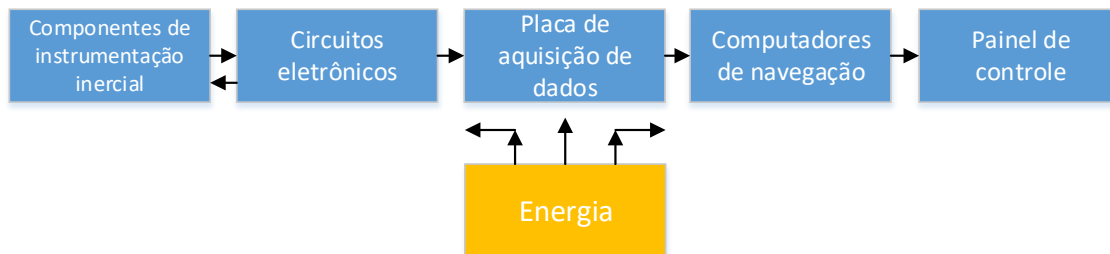


Figura 4.7 – Diagrama simplificado de blocos do SINS

Imediatamente depois de ser selecionado o arquivo do esquema do sistema ou equipamento, aparecerá a imagem do lado direito do sistema e os componentes que possui, além das ligações que existem entre eles. Como se vê na Figura 4.8, o SINS possui componentes redundantes que são: dois componentes de energia ou potência, dois circuitos eletrônicos, quatro giroscópios, seis acelerômetros, dois placas de aquisição e dois computadores e um painel de controle.

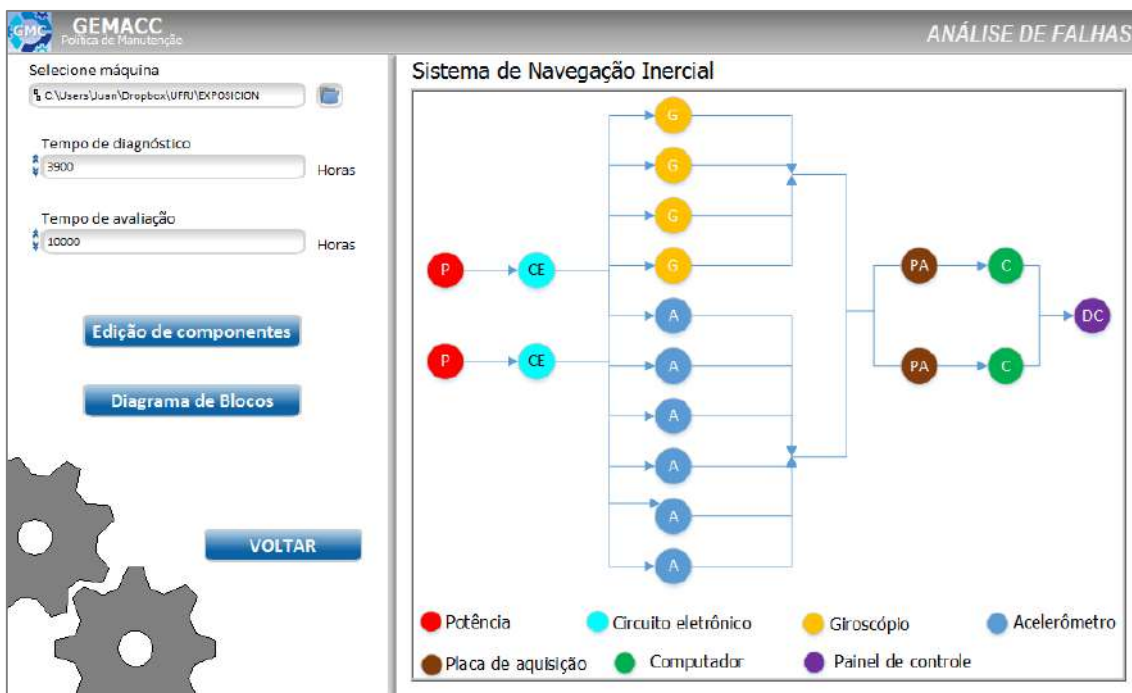


Figura 4.8 – Tela do módulo de Análise de Falhas com dados de entrada preenchidos.

Após selecionar o arquivo do sistema, o usuário deverá inserir os dois tempos (em horas) que se mostram, e que são requeridos para a análise. Os tempos necessários são os seguintes:

- Tempo de diagnóstico: É o tempo que o programa irá avaliar, e que conseqüentemente dará como resultado o diagnóstico preliminar (estado do sistema). Para nossos resultados serão usados os tempo de 2.600 e 3.900 horas, devido a que são tempos meios onde se deveriam realizar uma manutenção.
- Tempo de avaliação: É o tempo que o programa usará para simular a evolução ou comportamento da confiabilidade do sistema e de cada componente, ao longo do tempo definido pelo usuário. Para nossos resultados será usado 10.000 horas, pois é um tempo meio onde se realiza a revisão das máquinas.

Seguidamente será necessário editar os parâmetros de cada componente, para aquilo é só apertar a opção de Edição do Componente, que abrirá uma janela que mostrará todos os componentes do sistema assim como se mostra na Figura 4.9, e permitirá ao usuário selecionar o tipo de distribuição e os parâmetros que governam o seu comportamento. É claro que, dependendo do tipo de distribuição, se ativarão os parâmetros de que a distribuição precisa; se for a distribuição exponencial, a caixa de taxa de falha será editável, no entanto se for distribuição de Weibull, será possível editar os parâmetros de forma e escala.

	Distribuição de probabilidade	Taxa de Falha	Par.Forma	Par.Escala
Potência	Exponencial	9E-6	2.5	25000
Circuito eletrônico	Weibull	8E-6	1.8	9000
Giroscópio	Exponencial	3.8E-5	3.5	11750
Acelerômetro	Weibull	3E-5	2.2	11000
Placa de aquisição	Exponencial	1.2E-5	1.9	8700
Computador	Weibull	1E-5	3.5	12000
Painel de controle	Exponencial	2E-5	2.1	24000

SALVAR E VOLTAR

Figura 4.9 – Tela de Edição dos Componentes

Com os parâmetros inseridos e as distribuições selecionadas, se continuará com salvar os dados e voltar na janela principal do modulo de Análise de Falhas para que seja possível realizar a análise dos dados por meio da opção de método de Diagrama de Blocos, que, ao ser selecionada, mostrará outra janela com os resultados da análise. Os resultados que serão mostrados dependerão dos parâmetros que foram inseridos.

Se consegue ver que do lado esquerdo se têm os gráficos das confiabilidades (Figura 4.10) dos componentes e do sistema completo (cor preta), além disso, os limites de operação (0,9) e segurança (0,8) estão bem definidos ao longo do tempo de avaliação, que foi definido na tela principal do módulo de Análise de Falhas. As ferramentas que o gráfico possui permitem uma melhor visualização para o usuário. Do lado direito, se mostram os resultados numéricos, que são as confiabilidades de todos os componentes e do sistema.

O tempo diagnóstico que se mostra no lado superior direito, é aquele que for inserido na janela principal, e seguidamente embaixo se apresenta a confiabilidade do sistema naquele tempo.

Como resultado final, se obtém o diagnóstico, que está classificado em nove categorias, de acordo com os valores de confiabilidades de segurança e operação do sistema e de cada componente. A matriz de avaliação de ocorrência (Tabela 4.2), está configurado conforme os limites e diferenciado claramente por cores que permitem uma melhor visualização ao usuário.

É assim que graças a nosso resultado, é possível prevenir uma falha antes dela acontecer, pois o diagnóstico preliminar permite conhecer o estado da máquina em um tempo que será simulado, assim tomar as medidas necessárias para a operação adequada, considerando que os limites de operação e segurança já estão estabelecidos.

Acontece muito que nas empresas a prevenção de falhas é de grão importância, porém, para conseguir aquilo, apenas focam no ponto de vista da segurança, mas pode ser um problema do ponto de vista operacional, o que ocasiona gastos de recursos desnecessariamente para manter a instalação devido a uma condição operacional ineficiente.

Tabela 4.2 – Matriz de avaliação de ocorrência

	$C < 0,8$	$0,8 \leq C < 0,9$	$0,9 \leq C$
$S < 0,8$	Para garantir a segurança e operação do sistema, a manutenção correspondente deve se realizar imediatamente.	Para garantir a segurança e operação do sistema, a manutenção correspondente deve se realizar imediatamente.	Para garantir a segurança e operação do sistema, a manutenção correspondente deve se realizar imediatamente.
$0,8 < S < 0,9$	Se medidas imediatas para reparar não forem tomadas, os componentes redundantes podem garantir a confiabilidade do sistema, pois atendem aos requisitos de segurança	Condições de operação padrão	Condições de operação padrão
$0,9 < S$	Se medidas imediatas para reparar não forem tomadas, os componentes redundantes podem garantir a confiabilidade do sistema, pois atendem aos requisitos de segurança	Ótimas condições de operação do sistema, mas possui componente em estado de transição	Ótima condições de operação do sistema

Na Figura 4.10 se mostram os parâmetros que foram inseridos, para esse caso em particular, foi considerando todos os componentes com *distribuição de Weibull*, os quais foram obtidos da base de dados original [1]. Os resultados obtidos se mostram na Figura 4.11, que são os mesmos obtidos pela referência [1] (como se mostra na Figura 4.12), inclusive o tempo limite em horas (≈ 3.834 horas), com um erro nos resultados de 0,3%, para realizar uma manutenção que assegure uma condição operacional eficiente

Componente	Distribuição de probabilidade	Taxa de Falha	Par. Forma	Par. Escala
Potência	Weibull	9E-6	2.5	25000
Circuito eletrônico	Weibull	8E-6	1.8	9000
Giroscópio	Weibull	3.8E-5	3.5	11750
Acelerômetro	Weibull	3E-5	2.2	11000
Placa de aquisição	Weibull	1.2E-5	1.9	8700
Computador	Weibull	1E-5	3.5	12000
Painel de controle	Weibull	2E-5	2.1	24000

Figura 4.10 – Parâmetros de entrada com apenas distribuição Weibull.

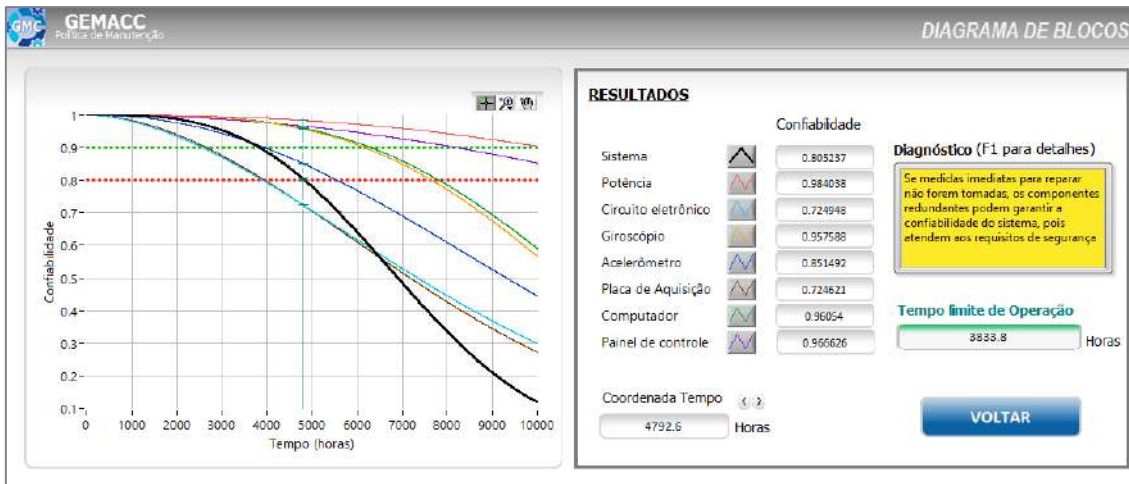


Figura 4.11 – Resultados simulados com distribuição Weibull (3.900 horas)

Finalmente, tem-se o diagnóstico resultante identificado por código de cor que indica o estado atual da máquina e as possíveis ações a serem efetuadas. Na mesma janela dos resultados, é possível obter mais detalhes do diagnóstico pressionando a tecla F1 e se abrirá uma janela com detalhes (confiabilidade de cada componente, confiabilidade do sistema, e o diagnóstico) naquele tempo diagnóstico como se mostra na Figura 4.13.

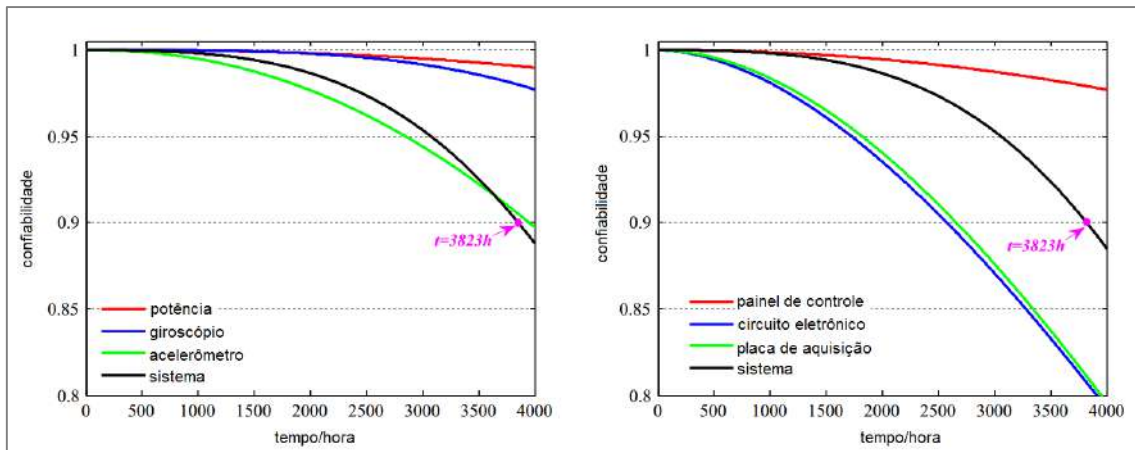


Figura 4.12 – Resultados simulados com distribuição Weibull [1]

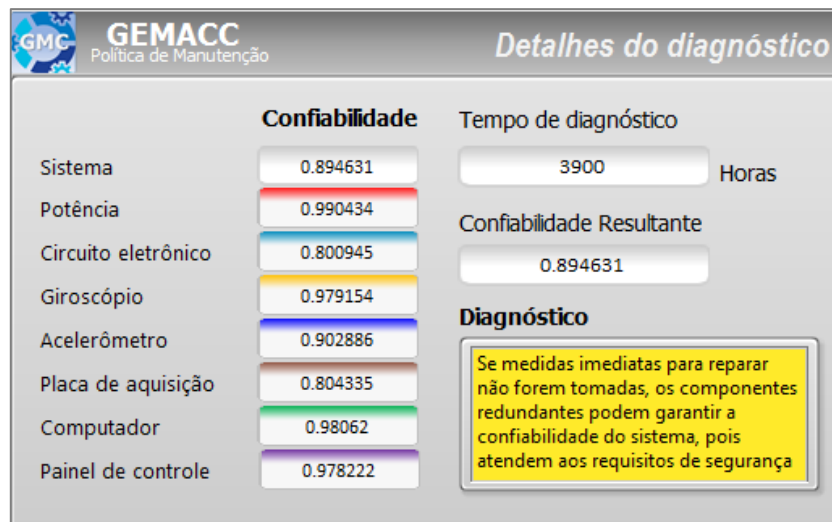


Figura 4.13 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull – SINS (3.900 horas)

Segundo a Figura 4.13, se observa que para um período de diagnóstico de 3.900 horas a confiabilidade do sistema está acima do valor limite de segurança, o que permite ao sistema continuar operando, porém, está abaixo do limite de operação, é por aquilo que o diagnóstico reporta que os componentes redundantes assegurarão o funcionamento da máquina, mas não menciona que a condição de operação será eficiente.

O tempo máximo em que o sistema trabalha com uma condição de operação eficiente, é até 3.833 horas, antes desse tempo as condições de operação são adequadas e a produtividade ótima. Assim como se conhece o tempo limite para operação, o tempo limite para segurança é obtido do gráfico (Figura 4.11) que seria 4.825 horas, o que significa que depois desse tempo a segurança não só do sistema, mas também do pessoal envolvido na operação das máquinas, correm um grande risco de ser afetadas.

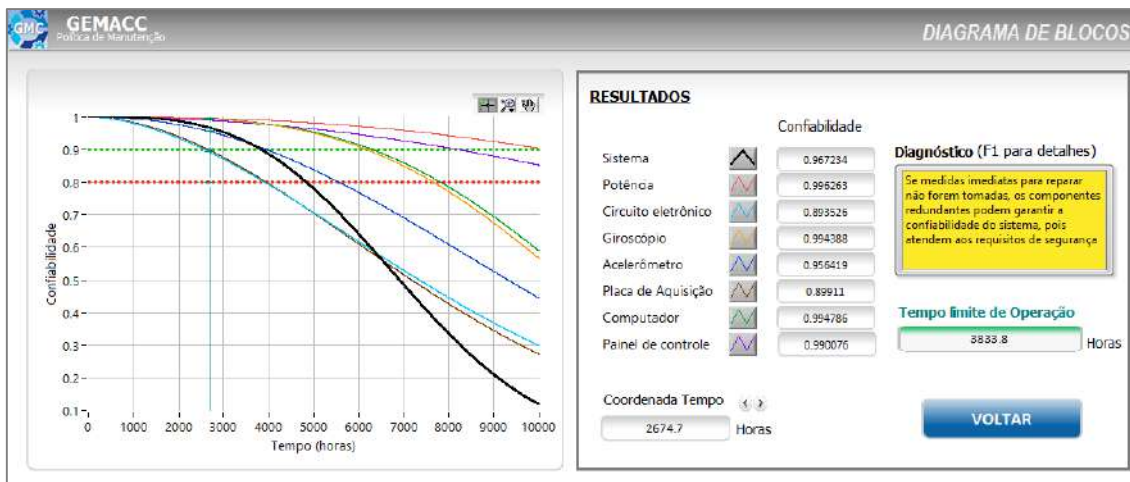


Figura 4.14 – Resultados simulados com distribuição Weibull (2.600 horas)

Na Figura 4.14, foram considerados os mesmos valores para os parâmetros de escala e de forma, não obstante, o tempo para que o programa obtenha um diagnóstico será diferente (2.600 horas), conseguindo assim os resultados nesse novo período; devido a esse tempo, o sistema possui dois componentes que estão abaixo do limite da confiabilidade de operação. Da mesma forma que no caso anterior, se pressiona a tecla F1 para obter mais detalhes do diagnóstico como se apresenta na Figura 4.15, onde é possível saber o motivo que resultado do diagnóstico não foi em ótimas condições, e é porque tem um item (circuito eletrônico) que não supera o limite de confiabilidade de operação.

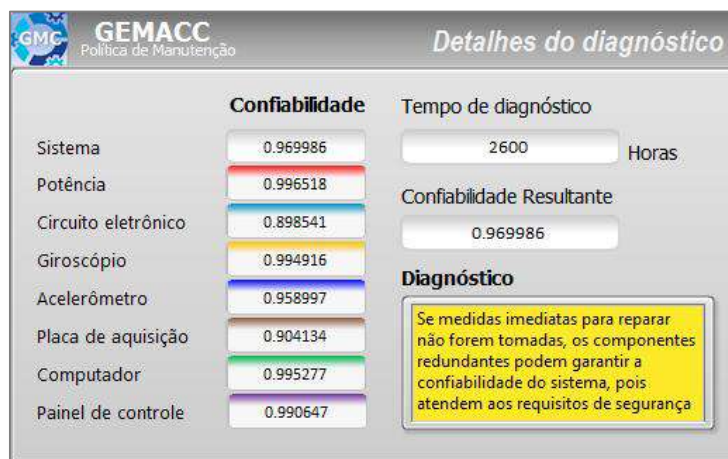


Figura 4.15 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull (2.600 horas)

Agora será simulado o mesmo sistema, mas desta vez a distribuição a ser utilizada será a *distribuição exponencial*, como se mostra na Figura 4.16, com parâmetros que já foram determinados pela leitura original [1].

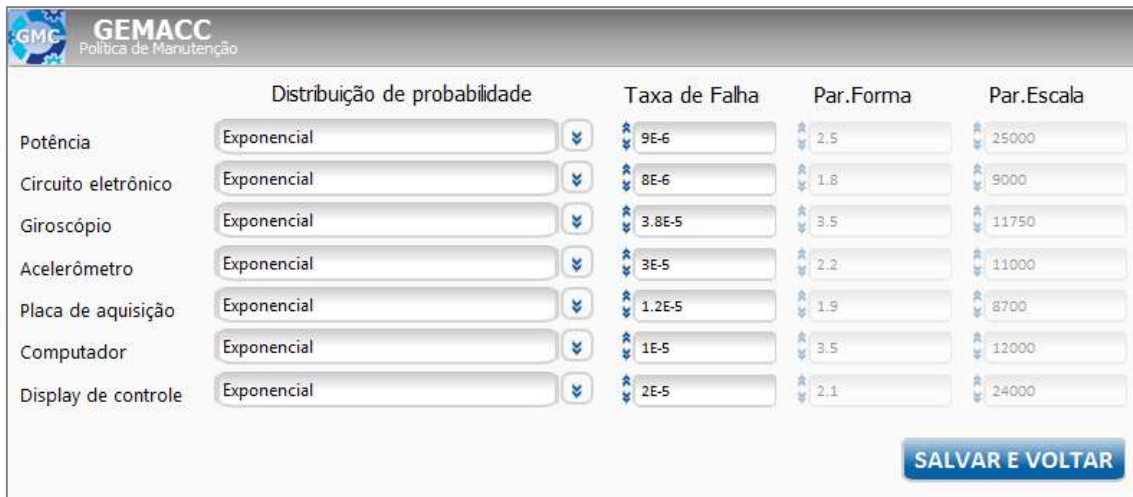


Figura 4.16 – Parâmetros de entrada com distribuição Exponencial.

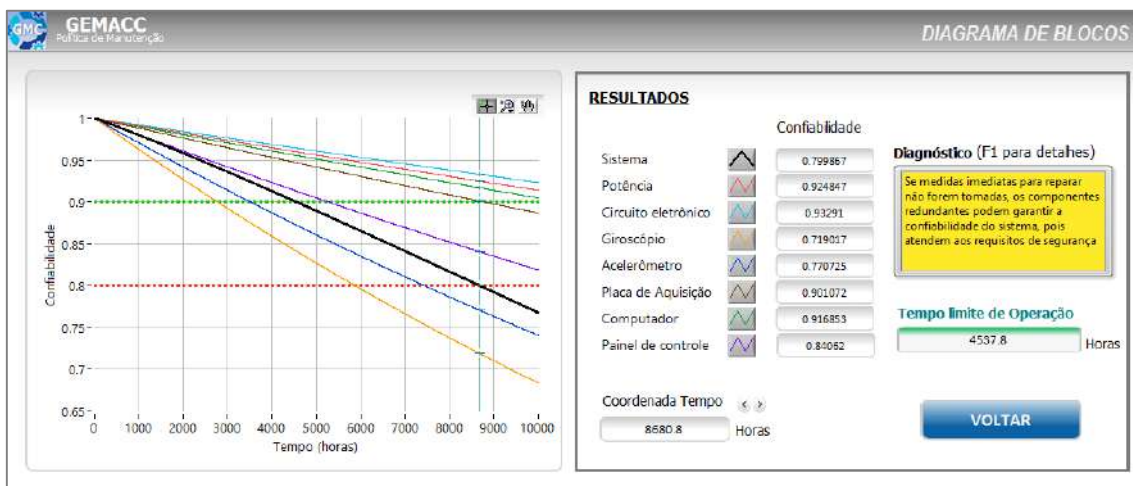


Figura 4.17 – Resultados simulados com distribuição Exponencial (3.900 horas)

Nessa outra simulação, cujos resultados se mostram na Figura 4.17, se introduzem parâmetros que correspondem só à distribuição exponencial e cujo tempo limite operacional é de 4.538 horas, por isso que para o tempo diagnóstico (sendo o mesmo que foi introduzido na simulação anterior), o programa determina que pode continuar operando mas precisa de reparos, não obstante, o sistema pode continuar funcionando devido aos componentes redundantes. É importante mencionar que para essa simulação não se está comparando o erro que existe entre os resultados da referência [1] e do programa GEMACC, devido a que na referência não se representou adequadamente a distribuição exponencial para o cálculo da confiabilidade, portanto os resultados da confiabilidade e o tempo de operação limite do sistema, não serão referência de comparação nesta dissertação.

Para essa simulação o tempo limite de segurança é 8.675 horas, o que significa que depois desse tempo a segurança não só do sistema, mas também do pessoal envolvido na operação das maquinarias correm um grande risco de ser afetadas.

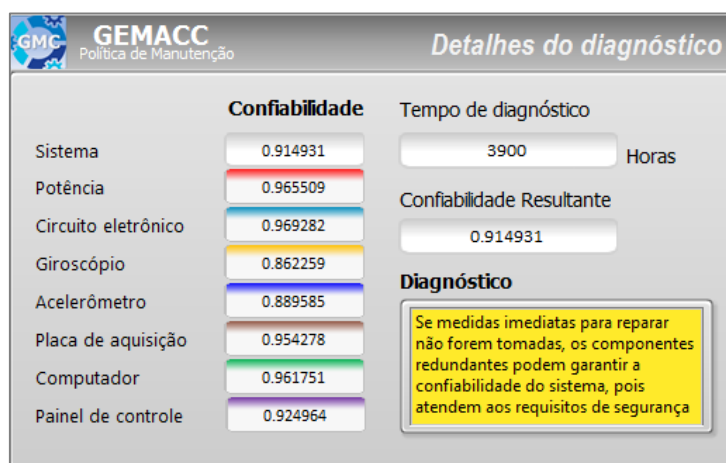


Figura 4.18 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial (3.900 horas)

Os detalhes do diagnóstico se apresentam na Figura 4.18, onde é simples identificar que o resultado do diagnóstico, mesmo tendo uma confiabilidade resultante de 0.914, foi devido a dois componentes (giroscópio e acelerômetro) cujo valor é menor que o valor da confiabilidade limite de operação.

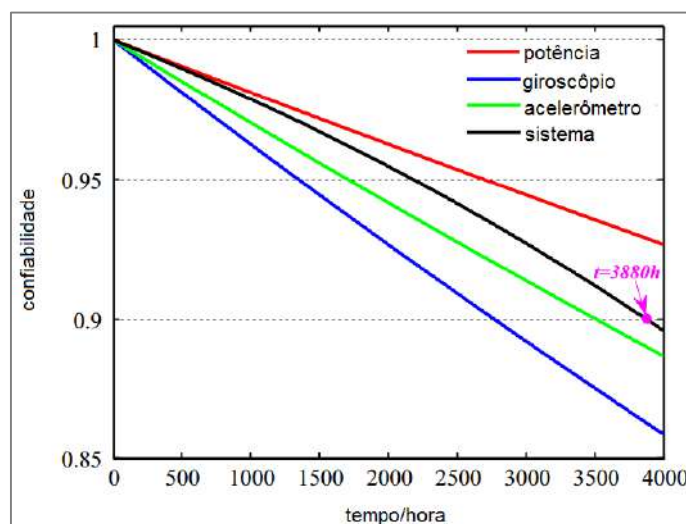


Figura 4.19 – Resultados simulados com distribuição Exponencial. [1]

É importante mencionar que o resultado do tempo limite de operação é diferente quanto da referência original [1], e o motivo é que a representação feita no programa GEMACC é correta, no entanto na referência a distribuição exponencial foi mal

representada, como se vê na Figura 4.19. Para demonstrar aquilo, é simplesmente avaliar um ponto na função de distribuição de probabilidade de qualquer componente.

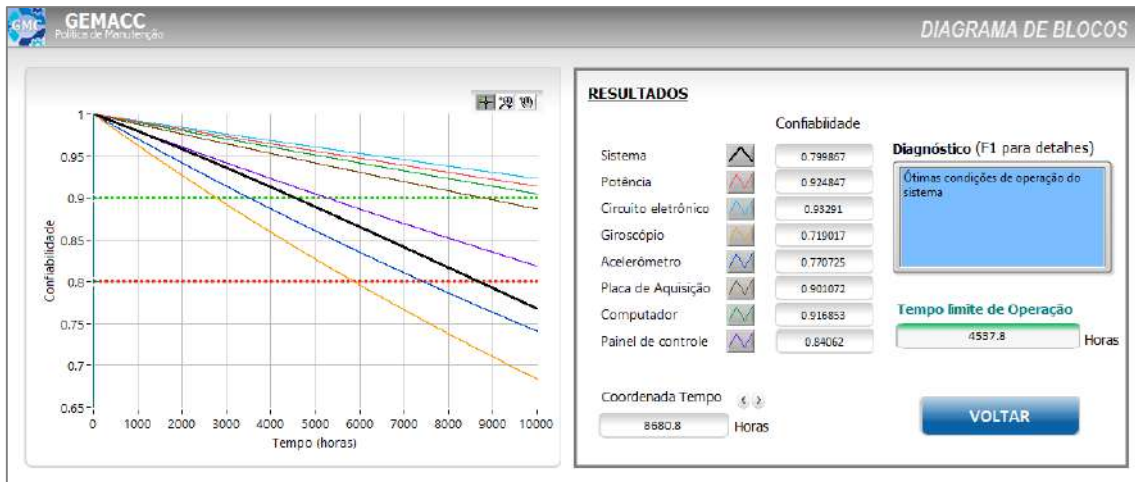


Figura 4.20 – Resultados simulados com distribuição Exponencial (2.600 horas)

Realizando agora a avaliação no mesmo tempo que foi estabelecido como tempo de diagnóstico para a distribuição de Weibull na Figura 4.14 (2.600 horas), e considerando os mesmos parâmetros da distribuição exponencial se obteve como diagnóstico (Figura 4.20) que o sistema e os componentes estão em ótimas condições de operação e, assim, tanto a confiabilidade do sistema quanto a confiabilidade de todos os componentes estão acima do valor do limite da confiabilidade de operação, e aquilo é verificável pressionando a tecla F1, para saber os detalhes que se mostram na Figura 4.21.

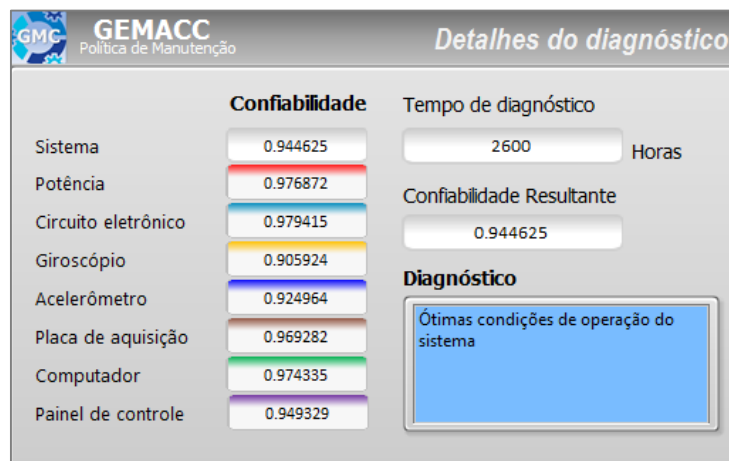


Figura 4.21 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial (2.600 horas)

Nas seguintes simulações se analisarão os casos cujos componentes possuem distribuição de Weibull para os dois tempos de avaliação (2.600 horas e 3.900 horas), com

o objetivo de mudar a distribuição de componentes críticos para obter como resultado uma melhor confiabilidade, e consequentemente um melhor diagnóstico.

Para o primeiro caso de 2.600 horas, baseados na Figura 4.14, mudaremos a distribuição de probabilidade do componente (circuito eletrônico) cujo valor de confiabilidade é menor que o valor limite de operação (0.9) para saber qual será o novo resultado, como se mostra na Figura 4.22.



Figura 4.22 – Mudança da distribuição (Weibull – 2.600 horas)

Os resultados devido aquela mudança se mostram na Figura 4.23 e Figura 4.24, onde é possível enxergar que o comportamento da confiabilidade do circuito eletrônico mudou em comparação com o resultado inicial na Figura 4.14 e Figura 4.15.



Figura 4.23 – Resultado da mudança da distribuição (Weibull – 2.600 horas)

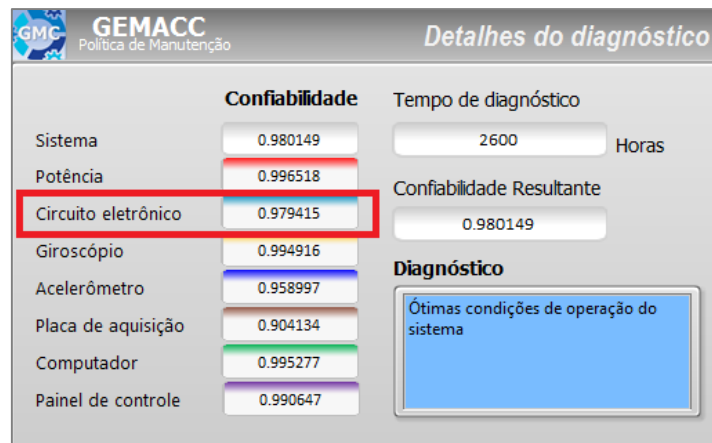


Figura 4.24 – Detalhes do resultado da mudança da distribuição (Weibull – 2.600 horas)

Na Figura 4.23 a confiabilidade do componente (circuito eletrônico) melhora o comportamento ao longo do tempo e para o tempo de avaliação de 2.600 horas é possível ver que na Figura 4.24 que o valor da confiabilidade mudou de 0,8985 para 0,9794, além disso o tempo limite de operação muda bastante, de 3.834 horas para 4.450 horas, o que significa que ainda tem mais tempo de funcionamento para manter as condições ótimas de operação.

4.3.2. Implantação do módulo de Análise de Falhas

Nesse segundo módulo, serão considerados três sistemas; Transformadores, Sistema de Aquecimento, Resfriamento e Energia (BCHP), e Sistema de Distribuição de Potência. Em comparação com o primeiro módulo, já não serão considerados apenas os parâmetros de falha, mas também de reparo, dessa forma será possível realizar as duas análises que se desejam (Método de Diagrama de Blocos e Análise de Markov).

Ao iniciar o programa GEMACC (Figura 4.4) se seleciona a base de dados que se possui e que será analisada, que em nosso caso é “Análise de Falhas e Reparos”. Depois aparecerá outra janela, como se mostra na Figura 4.25.

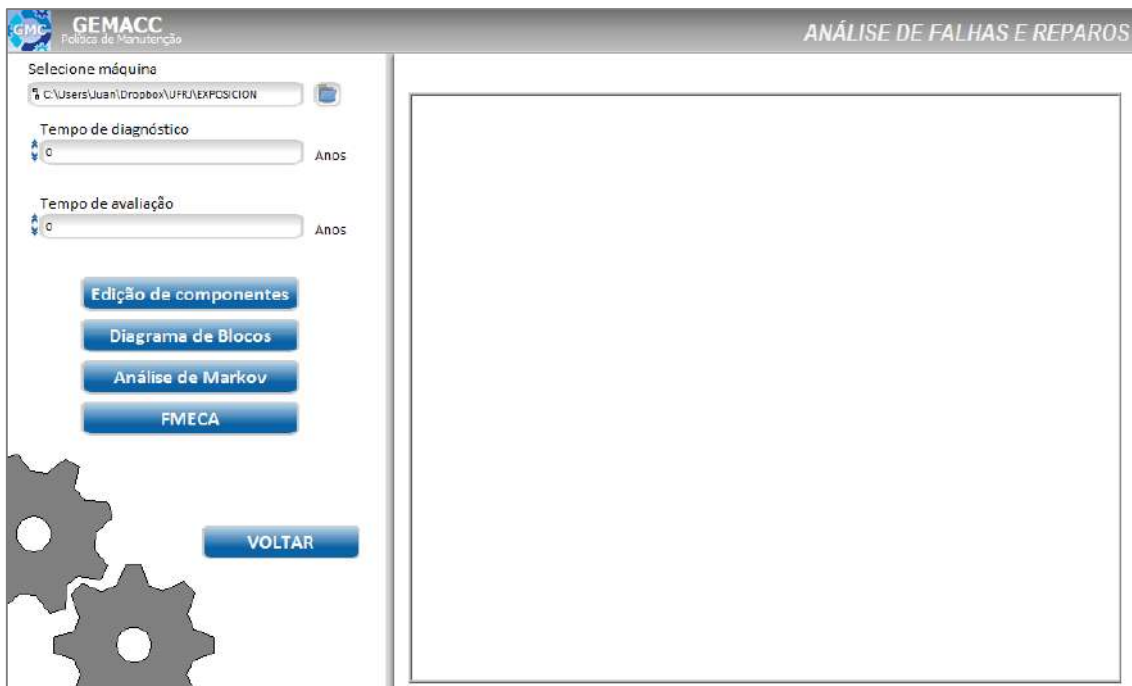


Figura 4.25 – Tela principal do módulo de Análise de Falhas e Reparos

Nesta janela será necessário selecionar o arquivo onde está o esquema do sistema que será analisado, que no nosso caso, como já foi mencionando serão três. Esses três sistemas, que serão descritos mais à frente, da mesma forma que no primeiro módulo, não necessariamente são sistemas ou componentes relacionados à engenharia naval, devido a que as empresas desse setor possuem confidencialidade com seus dados, no entanto são sistemas que poderiam formar parte de um sistema em uma embarcação, portanto as respostas serão de grão importância porque permitirá simular modelos análogos.

Da mesma forma que no módulo de Análise de Falhas (primeiro módulo), após de selecionar o arquivo do sistema, o usuário deverá inserir os dois tempos (em anos) que se mostram, e que são requeridos para a análise (Método de Diagrama de Blocos). Na mesma janela se apresentam quatro opções (Edição de componentes, Método de Diagrama de Blocos, Análise de Markov e FMECA), a primeira opção é bem parecido com a opção de Edição de componentes do primeiro módulo, só que possui mais um quadro para editar os dados de entrada dos parâmetros de reparo que servirá para a Análise de Markov, como se mostra na Figura 4.26

Componente	Distribuição de probabilidade	Taxa de Falha	Par.Forma	Par.Escala	Taxa de falha	Taxa de reparo
Transformador 1	Weibull	0.0000	3.4244	33.0745	0.0171	0.0685
Transformador 2					0.0114	0.0633

Figura 4.26 – Tela de Edição de Parâmetros para transformadores (25 anos).

Seguidamente será necessário editar os parâmetros de cada componente, o que permitirá ao usuário selecionar o tipo de distribuição e os parâmetros que governam o seu comportamento. O esquema do primeiro bloco é similar que no primeiro módulo, dependendo do tipo de distribuição, se ativarão os parâmetros que a distribuição precisa; se for a distribuição exponencial, a caixa de taxa de falha será editável, no entanto se for distribuição de Weibull, será possível editar os parâmetros de forma e escala. O esquema do segundo bloco (Análise de Markov) é o mesmo em todos os demais sistemas, onde se terá que preencher os dados de taxa de falha e taxa de reparo de cada componente. A seguir, se descreverão os três sistemas e se mostrarão os resultados em cada um deles, comparando-os com os da referência usada como referência.

4.3.2.1. Sistema de transformadores (TR)

É um sistema elétrico formado por uma rede principal, um barramento, disjuntor e dois transformadores como se mostra na Figura 4.27. O foco de análise será apenas o arranjo dos dois transformadores conectados em paralelo para gerar transmissão de energia, portanto os resultados apresentados serão em referência a eles. Para a análise de Markov, serão usados dados de transformadores com idades de 25 e 30 anos.

Com os parâmetros inseridos e a distribuição de probabilidade selecionada, se continuará a salvar os dados e voltar na janela principal do módulo de Análise de Falhas e Reparos para que seja possível realizar a análise dos dados por meio das opções de análise de Markov, método de Diagrama de Blocos e FMECA, ao ser selecionadas, mostrarão outra janela com os resultados da análise. Os resultados que serão mostrados dependerão dos parâmetros que foram inseridos, que em nosso caso são dados obtidos da referência [3].

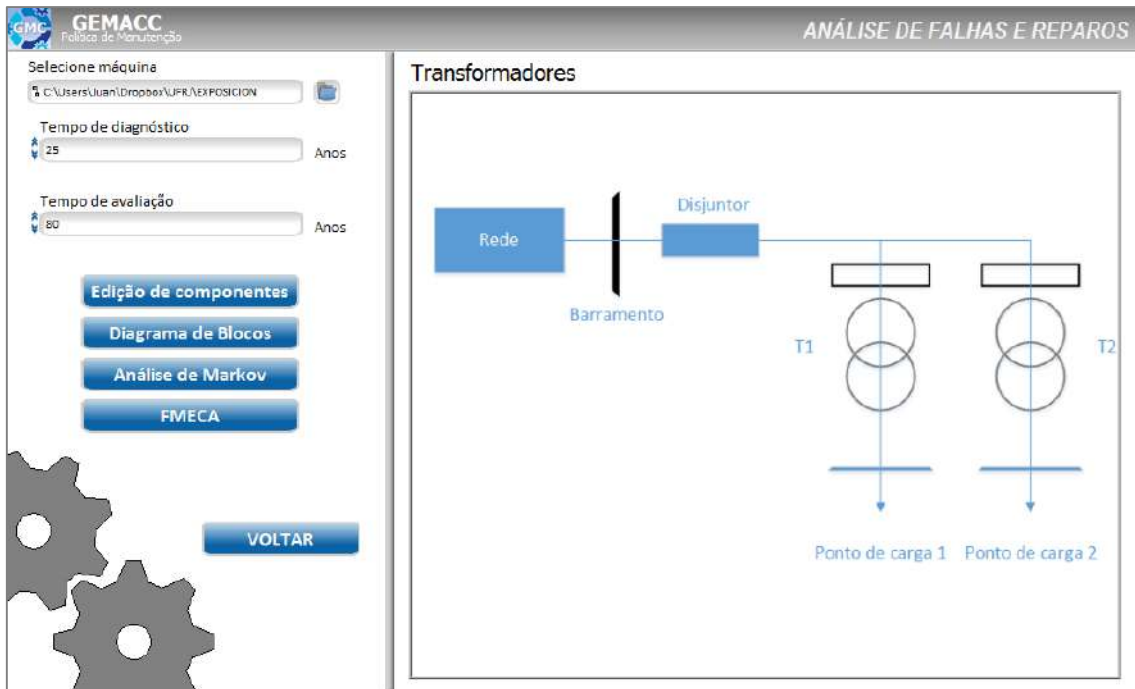


Figura 4.27 – Sistema de Transformadores simulado no programa GEMACC

a. Método de Diagrama de Blocos

Como se vê na Figura 4.26, foi inserida apenas uma caixa para preencher os parâmetros de um transformador, isso é devido que para o método de Diagrama de Blocos é necessário um histórico de falhas de um componente ou mais (redundantes) que cumprem a mesma função e que estão localizadas numa mesma zona específica dentro do sistema e, portanto, o resultado obtido por esse método será baseado no histórico de falhas de um transformador.

Para essa análise, o sistema será simulado em dois tempos de diagnóstico (25 e 30 anos) com a finalidade de comparar os resultados obtidos pelo programa e da referência [3]. Assim que se rodou o programa com o primeiro tempo, se obtiveram os resultados que se mostram na Figura 4.28.



Figura 4.28 – Resultados simulados com distribuição Weibull – TR (25 anos)

Os resultados obtidos pela simulação (gráfico plotado) são parecidos em comparação com os da referência [3], no entanto a diferença é que o gráfico (de interesse) que se mostra na referência (Figura 4.29) representa a probabilidade de falha, mas na simulação mostra o da confiabilidade. Os dois resultados são complementares e a soma deles é 1 (Eq. 3.7).

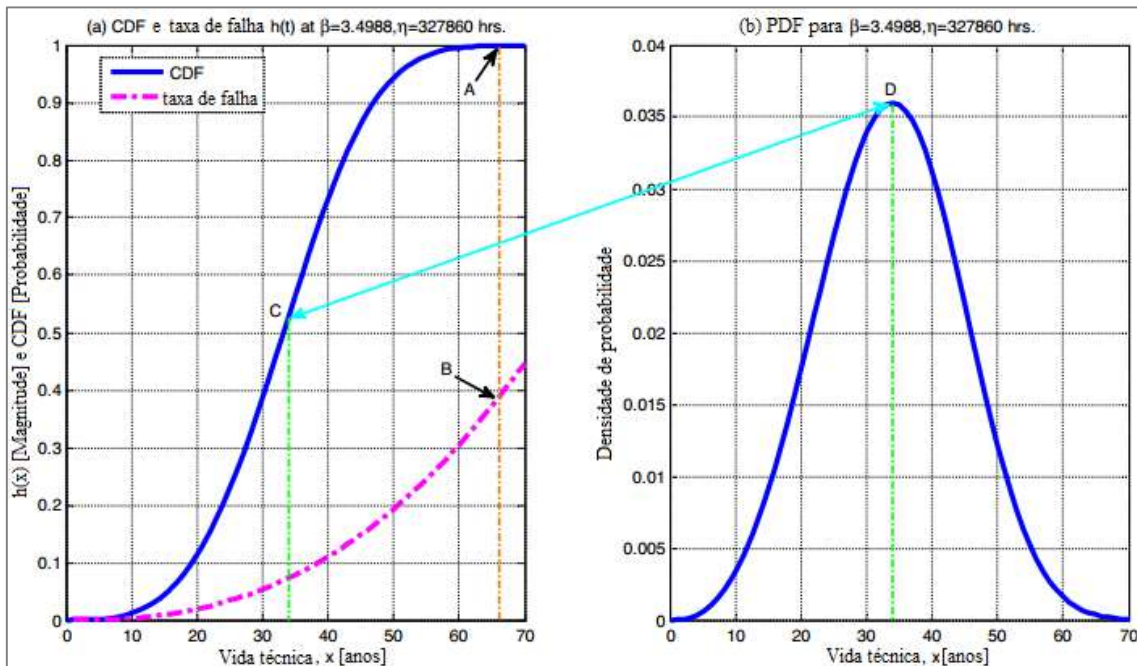


Figura 4.29 – Resultados simulados na referência para um transformador [3]

É claro que o programa GEMACC, consegue mostrar resultados além dos que se apresentam na referência, como é o diagnóstico preliminar, que está baseado apenas na confiabilidade e limites de aceitação (operação e segurança), portanto o resultado do diagnóstico é que se deve realizar a manutenção necessária para garantir a segurança do sistema, porque o valor da confiabilidade do sistema no tempo que foi avaliado (25 anos) está embaixo do limite de segurança ($\approx 24,6$ anos), então significa que depois desse tempo a segurança não só do sistema, mas também do pessoal envolvido na operação das máquinas, correm um grande risco de ser afetadas. Na mesma janela dos resultados, é possível obter mais detalhes do diagnóstico pressionando a tecla F1 e se abrirá uma janela com detalhes naquele tempo diagnóstico como se mostra na Figura 4.30. É importante mencionar que os resultados dos diagnósticos e também os códigos de cores que se apresentam em todos os resultados estão baseados na matriz de avaliação de ocorrência (Tabela 5.2).



Figura 4.30 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull – TR (25 anos)

Nessa janela, têm-se os detalhes do resultado do diagnóstico. O valor que nos interessa agora é a ocorrência, que será usado para realizar a análise de modo, causa e criticidade de falha (FMECA) pois será um input para calcular o valor do RPN e estabelecer uma política de manutenção adequada. Para o tempo simulado, o valor da ocorrência é 0,21, que, em comparação com o valor da referência (0,23), é quase o mesmo, mas apenas com um erro de aproximadamente 9%, que é devido à consideração de casas decimais.

Nessa segunda simulação do sistema de transformadores, se avaliará para um tempo diagnóstico de 30 anos, onde os parâmetros para o método de Diagrama de Blocos são os mesmos, não entanto os parâmetros de análise de Markov mudam para valores de transformadores com esse tempo de vida, como se vê na Figura 4.31.



Figura 4.31 – Tela de Edição de Parâmetros para transformadores – TR (30 anos).

Os resultados que se obtêm na gráfica (Figura 4.32) não mudam, como se tinha mencionado. Por outro lado, o resultado do diagnóstico se manteve igual devido a que o valor da confiabilidade para um tempo de 30 anos está também abaixo do nível permitido, para conhecer os detalhes do diagnóstico apertamos F1.



Figura 4.32 – Resultados simulados com distribuição Weibull – TR (30 anos)



Figura 4.33 – Detalhes do diagnóstico com distribuição Weibull – TR (30 anos)

Na Figura 4.33 pode-se ver que o valor da confiabilidade é de 0,64, portanto justifica o diagnóstico obtido pelo programa. Novamente, o valor de interesse é a ocorrência, cujo valor é de 0,357 que, em comparação com o valor da referência (0,387), são resultados parecidos com um erro de 8%, que, da mesma forma que na simulação anterior, é devido à consideração de casas decimais.

Como resposta adicional do GEMACC, é possível saber qual é o tempo ótimo para manter condições adequadas de operação, e que segundo as Figuras 4.28 e 4.32, é 19,7 anos, assim considerando esse tempo é possível não apenas poupar dinheiro em manutenções desnecessárias, mas também manter um bom desenvolvimento do sistema.

b. Análise de Markov

Para essa análise os parâmetros já foram inseridos na opção de edição de parâmetros e serão avaliados considerando o estado estacionário do sistema, sabendo que esses parâmetros são obtido de uma base de dados em um período curto de tempo (um ano). Os resultados que se mostraram não apenas nesse sistema, mas também nos outros, são a taxa falha do sistema, confiabilidade, MTBF e a ocorrência.

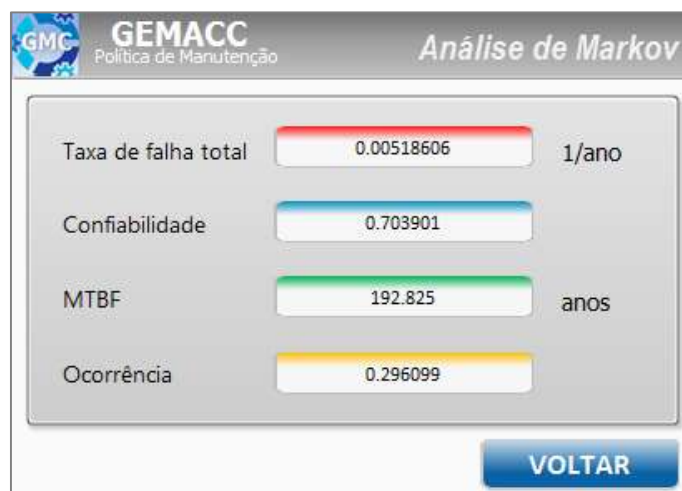


Figura 4.34 – Resultados da análise de Markov para transformadores de 25 anos.

Para esse primeiro caso de transformadores de 25 anos de idade, se obtêm os valores que se mostram na Figura 4.34. Para comparar o resultado do programa com o resultado da referência [3], é apenas necessário utilizar o resultado da última caixa (ocorrência), cujo valor é de 0,296, sendo o mesmo valor da fonte, portanto o programa é validado naquela resposta.

Em relação aos outros resultados, a taxa de falha foi calculada pela fórmula 3.38 e o MTBF pela fórmula 3.39, pois o sistema de transformadores, é um sistema redundante.

Para esse segundo caso de transformadores de 30 anos de antiguidade, se obtêm os valores que se mostram na Figura 4.35. Para comparar o resultado do programa com o resultado da referência [3], de igual forma se usará o resultado da última caixa (ocorrência), cujo valor é de 0,367 que é o mesmo valor da fonte sem erro nenhum, portanto o programa é validade com aquela resposta.

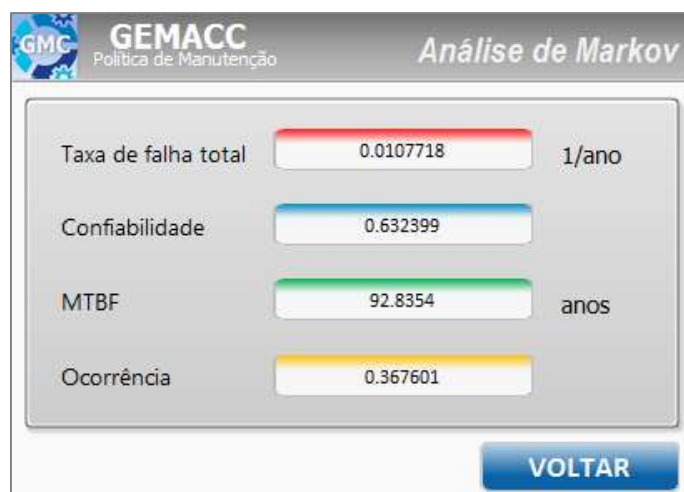


Figura 4.35 – Resultados da análise de Markov para transformadores de 30 anos.

Em relação aos outros resultados, como já tinha se mencionado, a taxa de falha foi calculada pela fórmula 3.38 e o MTBF pela fórmula 3.39, pois o sistema de transformadores, é um sistema redundante.

Como era esperado, as probabilidades de ocorrência das duas abordagens (método de Diagrama de Blocos e análise de Markov) não podem ser exatamente as mesmas, pois são derivadas de dados de horizontes temporais diferentes e para diferentes condições operacionais. Assim, o que é notável sobre as abordagens escolhidas é a capacidade de gerar probabilidades de falha que podem ser usadas na FMECA.

c. FMECA

Como já foi calculado o valor da probabilidade de ocorrência, não apenas nesse sistema, mas também nos próximos, e conhecendo os valores da severidade e detectabilidade dos componentes da referência [3] serão inseridos os valores análogos dentro do programa GEMACC, e considerando os valores das Tabelas 3.2, 3.3 e 3.5 se terá o valor do RPN ou criticidade, e com esse valor e considerando os critérios da Tabela 3.7 mas mudando os valores de $R = 12$ ($S=2$, $O=2$ e $D=3$), e $S = 60$ ($S=3$, $O=4$ e $D=5$), e se obtém o resultado da política de manutenção que seria melhor para cada componente do sistema.

Tabela 4.3 – FMECA de transformadores de potência [3]

Componente	Função	Modo de falha	O	S	D	RPN	Ações para correção
Tranformador	Transmissão de potência	Diminuição da resistência mecânica, térmica e elétrica	0.39	3.35	3	3.8894	Manutenção planejada

Na Tabela 4.3, se mostram os resultados da FMECA de transformadores de potência obtidos da referência, com os detalhes da função do componente, modos de

falha, os parâmetros de ocorrência, severidade e detectabilidade, além do cálculo do RPN e por último as ações de correção da falha.

The screenshot displays the GEMACC software interface for FMECA analysis of transformers. The title bar reads "ANÁLISE DE MODO, EFEITO E CRITICIDADE DE FALHA". The main window is titled "TRANSFORMADORES". It is divided into several sections: "Componentes" with a list containing "Transformador"; "Função" with the text "Usado para aumentar ou diminuir o nível de tensão Transmissão de energia."; "Modos de falhas (F1 para detalhes)" with the text "Diminuição da resistência mecânica, térmica e elétr"; "Política de Manutenção" with a yellow box containing "- Vigilância Especial Preventiva" and "- Manutenção preditiva"; "Criticidade" with a value of "30"; and "Nível de Risco" with a value of "Tolerável". A blue "VOLTAR" button is located at the bottom right.

Figura 4.36 – Resultados da FMECA para transformadores simulado no GEMACC.

Na Figura 4.36 se apresentam os resultados da FMECA simulados com o programa GEMACC, considerando cada detalhe da falha e adicionando indicadores que permitem ao usuário ter um diagnóstico eficiente. Se bem na opção de método de diagrama de blocos era possível obter um diagnóstico preliminar, não significa que é o definitivo, pois para aquela resposta apenas se considerou o valor da confiabilidade (complemento da probabilidade da ocorrência), no entanto na FMECA são considerados fatores que influenciam diretamente no funcionamento da máquina, como são a severidade e a detectabilidade. Comparando os resultados da política de manutenção e a ação de correção de ambos (referência e programa), se tem que entanto na referência menciona apenas que se deve realizar uma manutenção planejada, portanto preditiva, o programa fornece a mesma política de manutenção, validando assim a efetividade do programa para esse resultado.

Uma vantagem importante do programa GEMACC, é que além de fornecer a política de manutenção de cada componente, também fornece o valor da criticidade ou RPN e o nível de risco, onde se encontra a falha, ambos resultados com seus respectivos código de cores e cujos valores estão classificados na Tabela 3.6. Outra vantagem é que é possível saber os detalhes de falha de cada componente pressionando apenas a tecla F1, como se mostra na Figura 4.37, que dá detalhes da Tabela 4.3 e para nosso caso foram adicionados a causa de falha, as consequências e a detecção; devido a que são detalhes que não são mencionados na referência. Outro ponto que é importante mencionar é que a referência não dá detalhes dos valores de cada fator do RPN, nem a

interpretação desse resultado, no entanto isso não interferiu para estabelecer as ações a serem feitas para melhorar o estado do componente, mesmo não se conhecendo o critério.

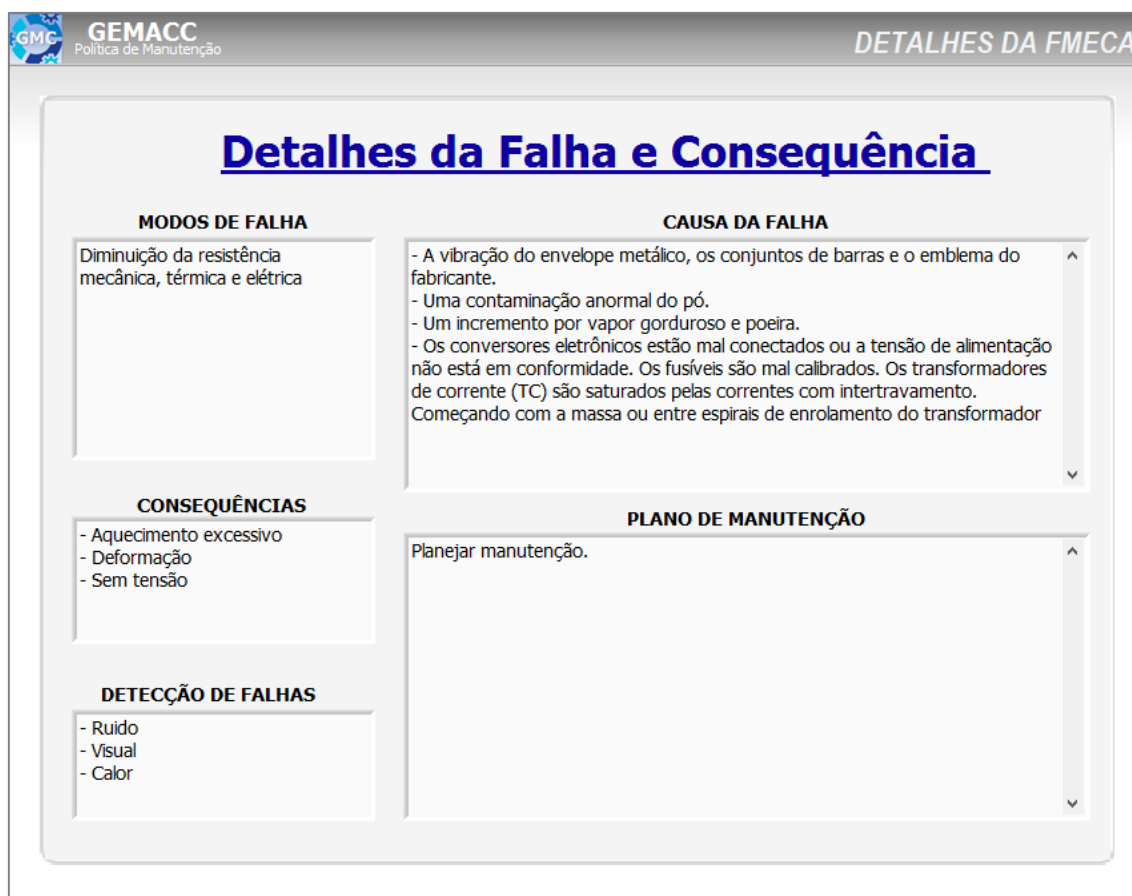


Figura 4.37 – Detalhes da FMECA de transformadores no programa GEMACC.

4.3.2.2. Sistema de aquecimento, resfriamento e energia (BCHP)

O sistema BCHP, é um sistema formado por três subsistemas (aquecimento, resfriamento e energia) e cada um com componentes que participam no funcionamento dele, devido a que é um sistema complexo, terá componentes que não apenas pertencerão a um subsistema, mas também será compartilhado com outros. O sistema possui dez componentes cuja ligação e dependência entre eles, permite a operabilidade dos subsistemas e portanto do sistema total em conjunto (Figura 4.38). É assim que a análise deste sistema complexo se realizará de duas formas; a primeira, será por componentes, e dessa forma ver os resultados do diagnóstico preliminar e ver o comportamento da confiabilidade ao longo do tempo de avaliação, e a segunda será a análise por subsistemas, que será para conferir os valores que aparecem na referência.

Existem dois esquemas do sistema que poderiam ser analisadas, a primeira é quando o sistema considera componentes redundantes, isso é que para realizar um trabalho é possível usar um componente ou outro; e o outro é quando considera componentes não redundantes, que para realizar um trabalho se precisa não apenas de um componente, mas a colaboração de outro para atingir o valor mínimo requerido para uma adequada operabilidade. Para a nossa análise será considerado apenas o sistema com componentes não redundantes, dessa forma veremos como afeta as dependências dentro do sistema, que é o que nos interessa.

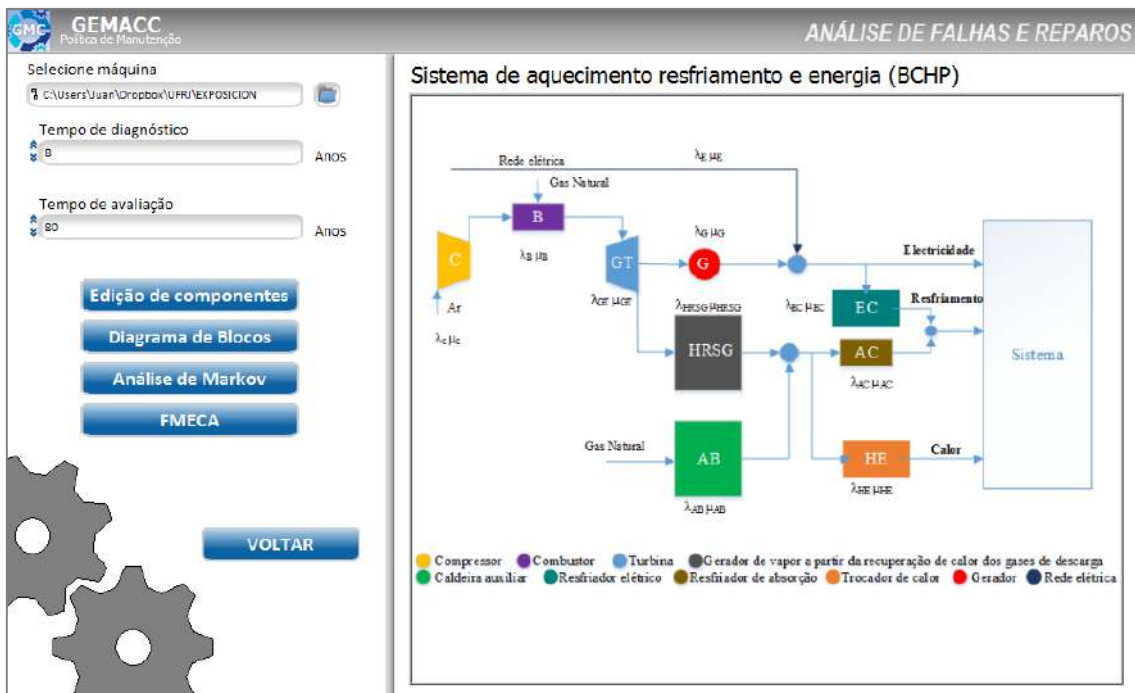


Figura 4.38 – Sistema de aquecimento, resfriamento e energia (BCHP).

Seguidamente usaremos a opção de edição de componentes (Figura 4.39) para inserir os valores dos parâmetros, tanto para o método de diagrama de blocos, quanto da análise de Markov.

GEMACC
Pública de Manutenção

EDIÇÃO DE PARÂMETROS

Componente	Diagrama de Blocos				Análise de Markov	
	Distribuição de probabilidade	Taxa de Falha	Par.Forma	Par.Escala	Taxa de falha	Taxa de reparo
Rede elétrica	Exponencial	0.003058	3.4344	38.0746	0.003058	5.08333334
Turbina de gás	Exponencial	0.00547945	3.4344	38.0746	0.00547945	2.5416667
Gerador	Exponencial	0.000463	3.4344	38.0746	0.000463	1.3625
HRSR	Exponencial	0.00273973	3.4344	38.0746	0.00273973	1
Caldeira auxiliar	Exponencial	0.011	3.4344	38.0746	0.011	1
Resfriador elétrico	Exponencial	0.00091324	3.4344	38.0746	0.00091324	2
Resfriador de absorção	Exponencial	0.00136966	3.4344	38.0746	0.00136966	2
Trocador de calor	Exponencial	0.00068493	3.4344	38.0746	0.00068493	1

SALVAR E VOLTAR

Figura 4.39 – Edição de parâmetros do sistema BCHP.

a. Método de Diagrama de Blocos

Para o cálculo da confiabilidade total do sistema mediante a metodologia de confiabilidade de sistemas, será considerada uma distribuição exponencial com os dados fornecidos pela referência [6], pois não tem um histórico de falhas para determinar parâmetros de distribuição de probabilidade como foi no do primeiro caso de transformadores, portanto esse método será apenas para avaliar o resultado que poderia se obter se tivéssemos dados suficientes. É importante mencionar que na referência [6], se considera como turbina a gás a união do compressor, combustor e a turbina.

Devido a que é um sistema complexo será necessário, o uso de um pivô para determinar a confiabilidade total, assim o pivô selecionado será aquele formado pelo resfriador elétrico e o resfriador de absorção. Para esse sistema, serão simulados três tempos diagnóstico (9, 15, 40 anos) para conhecer as respostas em cada um deles, esses tempos foram escolhidos porque nos permite obter diferentes resultados em questão da criticidade, considerando como valores de variação 17 e 35 anos que são os tempos limites de operação e segurança.



Figura 4.40 – Resultados por componente simulados com distribuição exponencial – BCHP (9 anos)

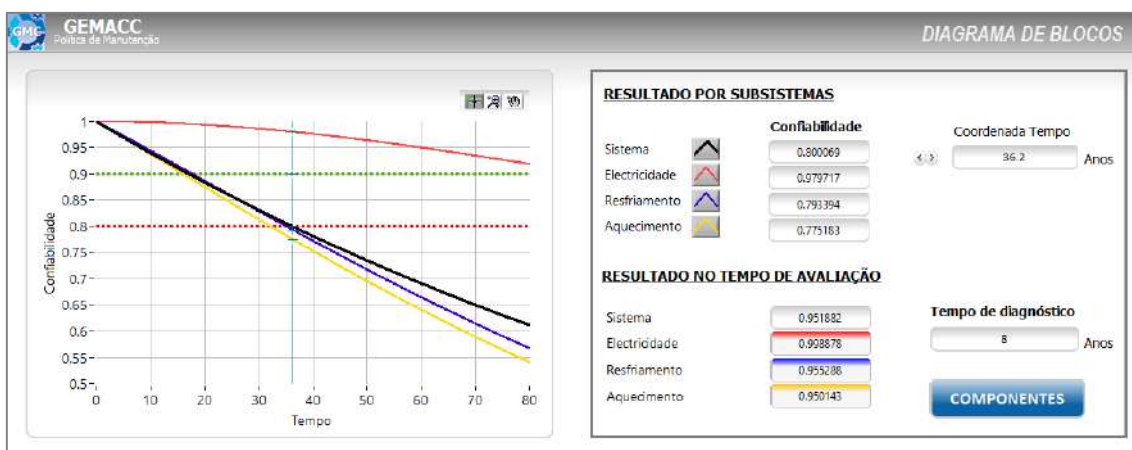


Figura 4.41 – Resultados por subsistemas simulados com distribuição exponencial – BCHP (9 anos)

Os resultados obtidos pela simulação para um tempo de nove anos se mostram nas Figura 4.40 e 4.41, onde se representam as confiabilidades por componente e por subsistema respectivamente, além da confiabilidade total do sistema. Do lado direito na Figura 4.40, se observa que o tempo limite de operação é de 16.9 anos, portanto significa que antes desse tempo as condições do sistema estão ótimas, sempre e quando o valor da confiabilidade do sistema e do componente sejam maiores daquele limite (0,9) no entanto o diagnóstico pode mudar se apenas o valor de um componente for menor que aquele valor, como se mostra na Figura 4.42.

Para analisar o comportamento da confiabilidade dos subsistemas, é necessário selecionar a opção Subsistemas dentro da janela inicial de método de Diagrama de Blocos (Figura 4.40), depois aparecerá outra janela (Figura 4.41) onde foi simulado o

comportamento das confiabilidades dos subsistema, e onde pode se ver o valor da confiabilidade de cada subsistema avaliado no tempo diagnóstico e da mesma forma do sistema todo, para que não haja dúvidas a curva da confiabilidade do sistema que se mostra nessa janela é obtida pelo cálculo de confiabilidade de sistemas realizada com componentes, pois essa curva não é possível ser calculada com a confiabilidade de cada subsistema, devido a que possuem componentes compartilhados, tema que não é o escopo dessa dissertação, porque é apenas considerado dados de falhas dos componentes independentes e também porque não se possuem dados de essas cargas compartilhadas o qual poderia ser um análise de estudo futuro, portanto essa simulação nos permite apenas ver como é o comportamento de cada subsistema, observando que o subsistema elétrico possui um melhor comportamento da confiabilidade em comparação com os outros, fato que é razoável de se pensar, pois todos os subsistemas dependem da energia para funcionar.

Para essa segunda avaliação do sistema para um tempo de 15 anos, é claro que o tempo limite de operação não mudou, pois os parâmetros de confiabilidade são os mesmos, por outro lado o diagnóstico preliminar é diferente, como se vê na Figura 4.43 nos detalhes do diagnóstico, a caldeira auxiliar tem um valor 0,847894 de confiabilidade menor que o valor limite estabelecido (0,9).

Analisando a Figura 4.44, os únicos valores que mudaram foram os da confiabilidades do subsistemas no tempo diagnóstico, que como era de esperar diminuíram, pois o sistema estaria mais tempo em uso sem manutenção nenhuma. É importante mencionar que o método de Diagrama de Blocos por subsistemas é apenas para saber o comportamento pois não oferece diagnóstico que permita ao usuário programar uma manutenção, portanto, o terceiro tempo de diagnóstico não será mostrado.



Figura 4.42 – Resultados simulados com distribuição exponencial – BCHP (15 anos)

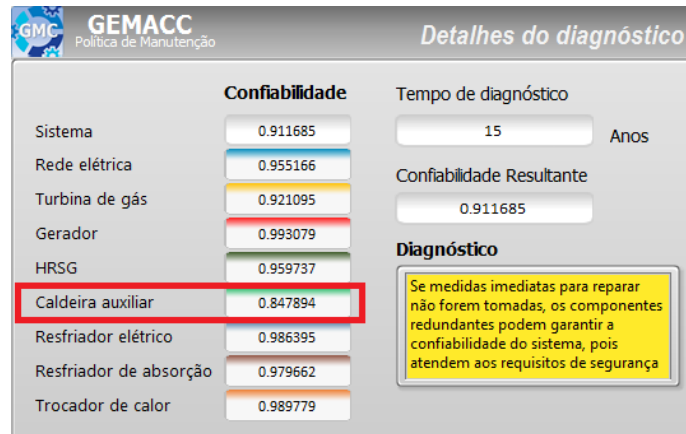


Figura 4.43 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial – BCHP (15 anos)

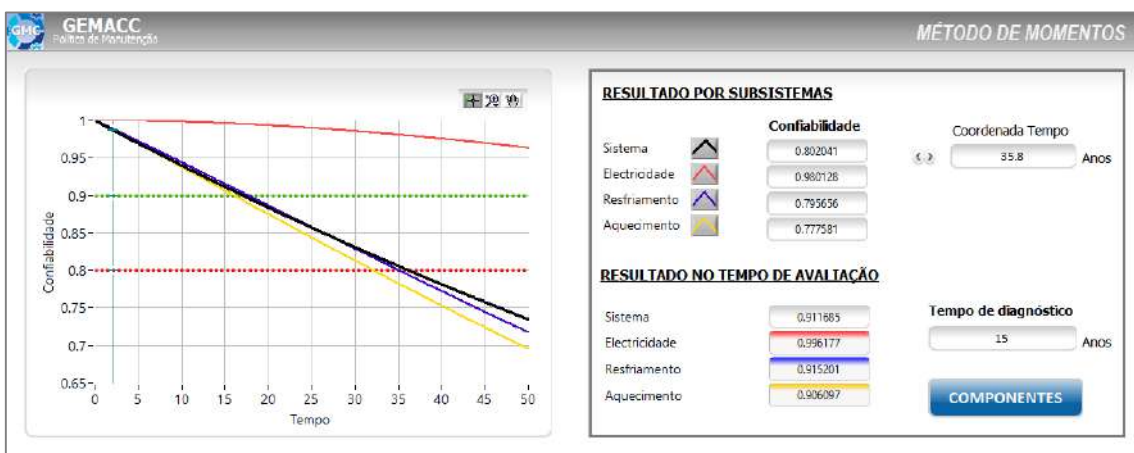


Figura 4.44 – Resultados por subsistemas simulados com distribuição exponencial – BCHP (15 anos)

Simulando agora o sistema para um tempo de 40 anos (Figura 4.45) veremos que o diagnóstico mudou novamente porque a confiabilidade do sistema no tempo de diagnóstico simulado está abaixo do limite de segurança (0,8)

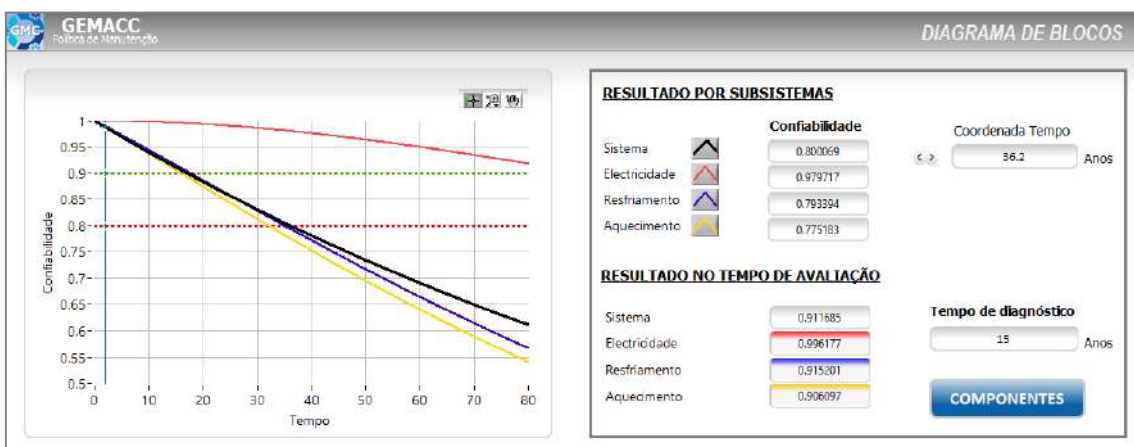


Figura 4.45 – Resultados por subsistemas simulados com distribuição exponencial – BCHP (40 anos)

Para saber os detalhes que estão por trás do diagnóstico (Figura 4.46) pressionamos a tecla F1 para saber o valor da confiabilidade do sistema e quais componentes estão por abaixo do valor limite de segurança.

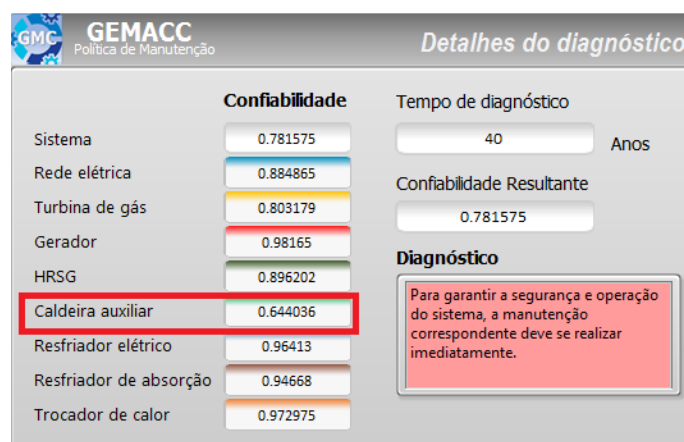


Figura 4.46 – Detalhes do diagnóstico com distribuição exponencial – BCHP (40 anos)

No quadro de detalhes do diagnóstico (Figura 4.46), é possível identificar que a caldeira auxiliar novamente é o motivo para que diagnóstico do sistema mude, dado que os demais componentes permanecem com um valor acima de 0,8, isso nos permite concluir que a caldeira auxiliar é um componente crítico dentro do sistema, considerando obviamente, um sistema não redundante.

b. Análise de Markov

Considerando os parâmetros que foram inseridos na opção de edição de parâmetros, se simularão os resultados da análise de Markov para os três subsistemas, para aquilo se devem indicar algumas especificações de funcionamento do sistema.

No subsistema elétrico, o sistema pode funcionar com apenas a alimentação da rede elétrica, no entanto a capacidade que fornece a turbina a gás não é o suficiente para conseguir aquele objetivo, portanto isso significa falha nesse subsistema. A Tabela 4.4 mostra os quatro estados da análise de Markov, onde “0” representa estado de operação e “1” representa o estado de falha (se usará também os mesmos valores para os outros subsistemas). [6]

Em conclusão, para a análise de Markov, o resultado do valor da confiabilidade desse subsistema será dado pela soma das probabilidades do sistema que estão nos estados 1 e 3.

Tabela 4.4 – Estados de operação do subsistema elétrico – BCHP [6]

Subsistema	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
Eletricidade da rede elétrica	0	1	0	1
Eletricidade da turbina de gás	0	0	1	1
Capacidade	Máxima capacidade	Capacidade da turbina de gás	Capacidade da rede elétrica	0
Resultado	0	Energia insuficiente	0	1

No subsistema de aquecimento, o calor vem por dois caminhos na Figura 4.38, um deles é o calor recuperado do HRSG e a outra é da caldeira auxiliar. Nesse caso, se o custo de investimento for considerado no projeto de aquecimento, a caldeira auxiliar será usada apenas para fornecer o restante de calor quando o calor recuperado não satisfizer completamente a demanda de calor e o sistema de aquecimento não é redundante. Se o custo de investimento for considerado no projeto de aquecimento, a caldeira auxiliar será usada apenas para fornecer o restante de calor quando o calor recuperado não satisfizer completamente a demanda de calor. Adicionalmente, a eletricidade é um fonte necessária e obrigatória para que componentes como a bomba, ventilador e outros componentes funcionem no processo de aquecimento, portanto a confiabilidade afeta diretamente a confiabilidade do subsistema de aquecimento. Da Figura 4.38, é importante saber que o calor necessário para o sistema de aquecimento não é o suficiente, nem quando o HRSG ou a caldeira auxiliar falharem, e que o subsistema só conseguiria funcionar com todos os componentes operativos. A Tabela 4.5 mostra os 16 (2^4) estados da análise de Markov, considerando os pontos que foram mencionados.

Em conclusão, para a análise de Markov, o resultado do valor da confiabilidade desse subsistema será dado pelo estado 1.

Tabela 4.5 – Estados de operação do subsistema de aquecimento – BHP [6]

Estados	HRS	AB	HE	Subsistema de eletricidade	Resultado
1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	Calor insuficiente
3	0	0	1	0	1
4	0	0	0	1	1
5	0	1	1	0	1
6	0	1	0	1	1
7	0	0	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	Calor insuficiente
10	1	1	0	0	1
11	1	0	1	0	1
12	1	0	0	1	1
13	1	1	1	0	1
14	1	1	0	1	1
15	1	0	1	1	1
16	1	1	1	1	1

No subsistema de resfriamento, a demanda é fornecida pelo resfriador elétrico e o resfriador de absorção, portanto da mesma forma que o sistema de aquecimento será necessário o funcionamento de ambos componentes e a confiabilidade do subsistema de eletricidade determina também a confiabilidade do sistema de distribuição do resfriamento como bombas e ventiladores. Logo, quando o resfriador elétrico ou o resfriador de absorção não funcionam, a refrigeração produzida não será suficiente para satisfazer a demanda mínima. Ambos os componentes devem funcionar para que a demanda de refrigeração seja satisfeita. A Tabela 4.6 mostra os 32 (2^5) estados da análise de Markov, considerando os pontos que foram mencionados.

Em conclusão, para a análise de Markov, o resultado do valor da confiabilidade desse subsistema será dado pelo estado 1.

Tabela 4.6 – Estados de operação do subsistema de resfriamento – BCHP [6]

Estados	HRSG	AB	EC	AC	Subsistema de eletricidade	Resultado
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	Falta de refrigeração
3	0	0	1	0	0	Falta de refrigeração
4	0	0	0	1	0	Falta de refrigeração
5	0	0	0	0	1	1
6	0	1	1	0	0	Falta de refrigeração
7	0	1	0	1	0	Falta de refrigeração
8	0	1	0	0	1	1
9	0	0	1	1	0	1
10	0	0	1	0	1	1
11	0	0	0	1	1	1
12	0	1	1	1	0	1
13	0	1	1	0	1	1
14	0	1	0	1	1	1
15	0	0	1	1	1	1
16	0	1	1	1	1	1
17	1	0	0	0	0	Falta de refrigeração
18	1	1	0	0	0	Falta de refrigeração
19	1	0	1	0	0	Falta de refrigeração
20	1	0	0	1	0	Falta de refrigeração
21	1	0	0	0	1	Falta de refrigeração
22	1	1	1	0	0	1
23	1	1	0	1	0	Falta de refrigeração
24	1	1	0	0	1	1
25	1	0	1	1	0	1
26	1	0	1	0	1	1
27	1	0	0	1	1	1
28	1	1	1	1	0	1
29	1	1	1	0	1	1
30	1	1	0	1	1	1
31	1	0	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1

Tabela 4.7 – Resultados de taxa de falha e confiabilidade do sistema BCHP [6]

Subsistema	Taxa de falha	Confiabilidade
Eletricidade	0,003058	0,99939879
Aquecimento	0,02296211	0,98543316
Resfriamento	0,02456028	0,98498995



Figura 4.47 – Resultados da análise de Markov para sistema BPHP.

Comparando o resultado da Tabela 4.7 obtido da referência e do programa GEMACC (Figura 4.47) se têm os resultados das porcentagens de erros na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Erros percentuais dos valores obtidos pelo programa GEMACC

Subsistema	Taxa de falha	Confiabilidade
Eletricidade	0,00000%	0,00002%
Aquecimento	0,00004%	0,23595%
Resfriamento	0,00008%	0,23583%

Como se observa na Tabela 4.8, os erros são praticamente desprezíveis, portanto valida o programa. Além disso, pode-se reparar que da mesma forma que no método de diagrama de blocos, o sistema de eletricidade possui uma confiabilidade maior, isso é devido a que todos os sistemas dependem diretamente dessa fonte para funcionar e não pode falhar, pois isso significaria uma parada de planta e perda na produção.

c. FMECA

Para esse sistema, não será apresentada essa análise, devido a que a referência [6] não possui detalhes necessários para preencher a base de dados da matriz FMECA, não será possível apresentar essa parte do programa para esse sistema, mesmo tendo já o valor da ocorrência não permite estabelecer uma política de manutenção, pois precisaria também do valor da severidade e detectabilidade de cada componente, não obstante, o seguinte sistema será exclusivamente para mostrar como seria a opção da FMECA para vários componentes.

4.3.2.3. Sistema de distribuição de potência (SDP)

O sistema que será apresentado em seguida é o sistema de distribuição de potência, composto basicamente por oito componentes como se mostra na Figura 4.48. Devido à falta de informação, tanto no esquema como nos dados fornecidos pela referência [4], não se realizou a análise estocástica nesse sistema, mas se apresenta a opção da FMECA onde se pode ver completamente todos os fatores que já foram mencionados no sistema de transformadores, com a vantagem de que são mais componentes e detalhes, portanto mais resultados.

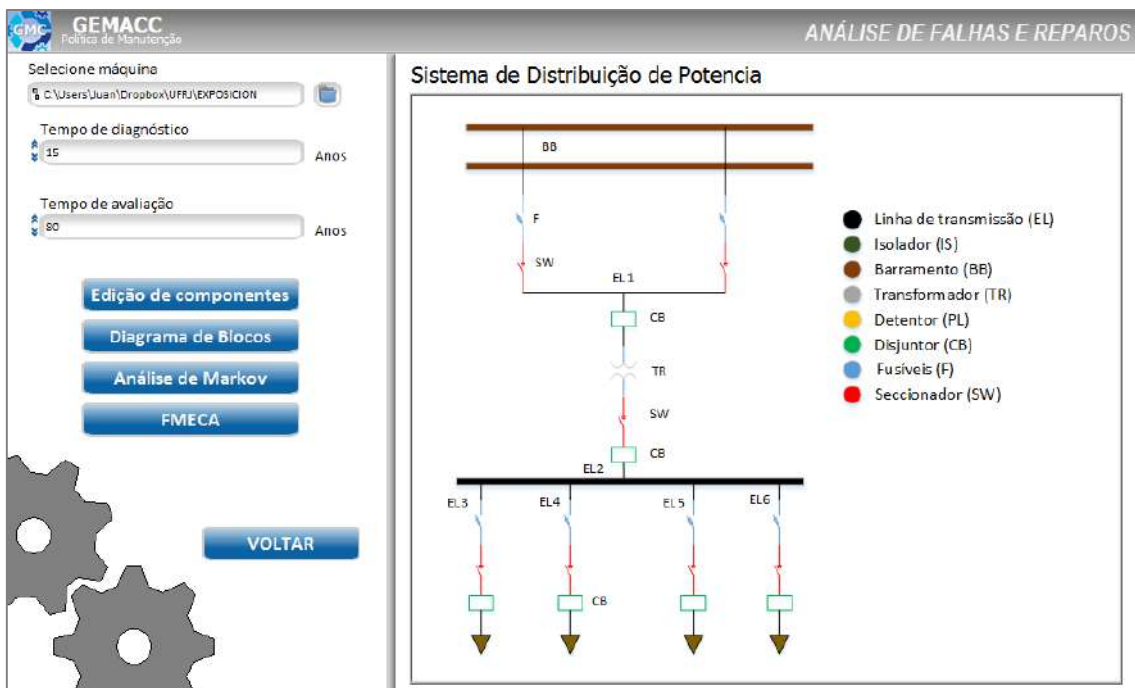


Figura 4.48 – Sistema de distribuição de potência simulado no programa GEMACC

a. FMECA

Teoricamente, os valores obtidos da criticidade ou RPN teriam que ser derivados da análise estocástica, não obstante, os valores foram modificados analogamente com os valores estabelecidos nessa dissertação.

Como se pode ver nas Figuras 4.49, 4.50 e 4.51, as políticas de manutenção podem ser três, as quais se mencionam na Tabela 3.7 e o nível de risco também é classificado em três (Tabela 3.6) os códigos de cores podem ser os mesmos para os três casos (criticidade, política de manutenção e nível de risco) como se mostram nas figuras já mencionadas.

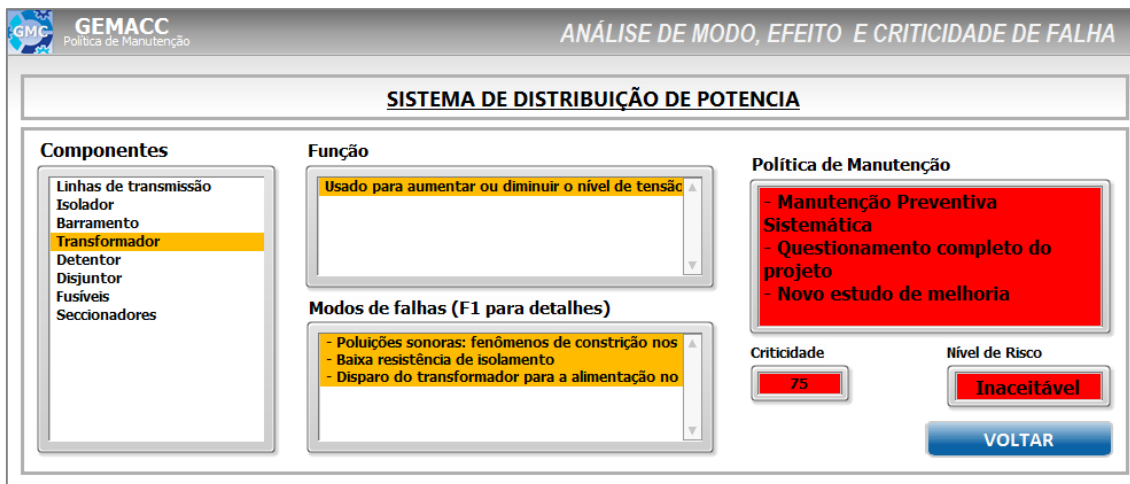


Figura 4.49 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (transformador).

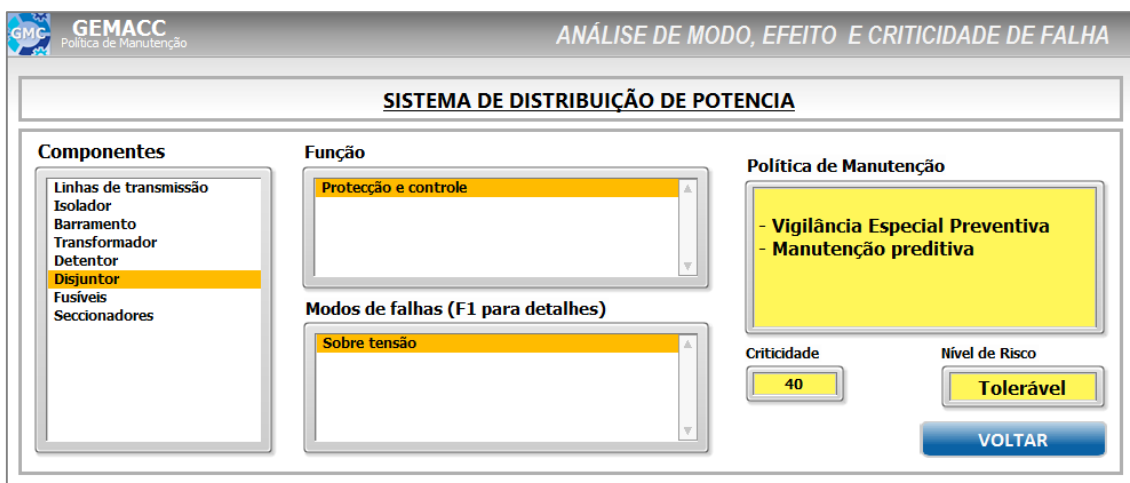


Figura 4.50 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Disjuntor).

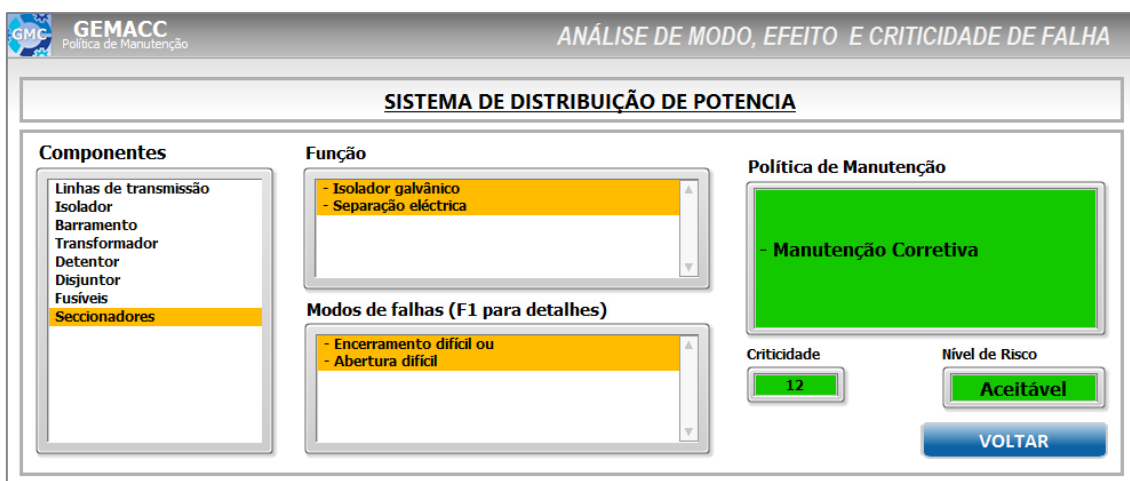


Figura 4.51 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Seccionadores).

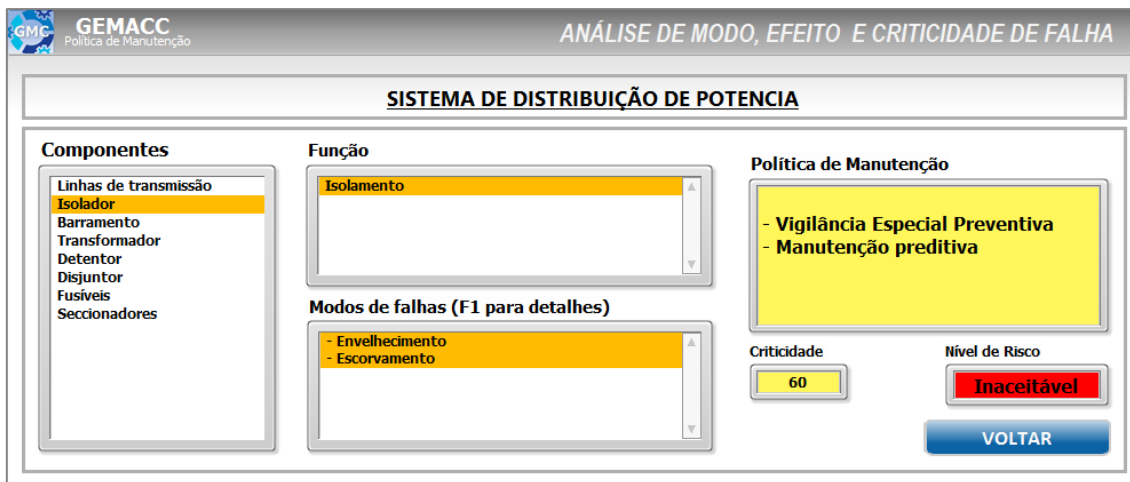


Figura 4.52 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Isolador).

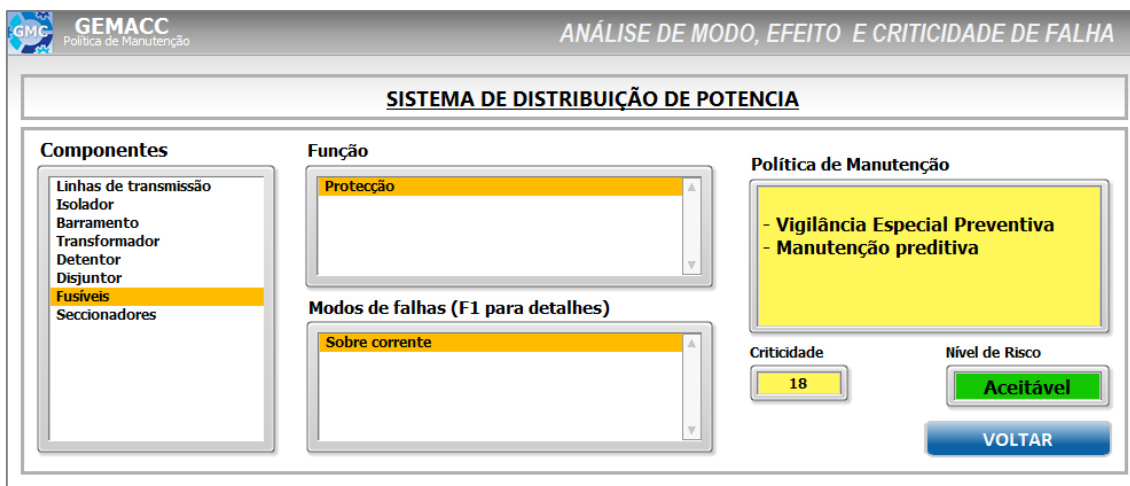


Figura 4.53 – Resultados da FMECA para um SDP no GEMACC (Fusíveis).

Por outro lado, também podem ser diferentes, isso é que a cor da caixa do nível de risco pode ser diferente das dos outros dois, entretanto eles sempre serão da mesma cor.

Como já foi mencionado no sistema de transformadores, se o usuário quiser saber os detalhes da falha e plano de manutenção total, se consegue abrir outra janela pressionando a tecla F1 e os resultados aparecerão como se mostra na Figura 4.54.

Detalhes da Falha e Consequência

MODOS DE FALHA

- Poluições sonoras: fenômenos de constrição nos transformadores
- Baixa resistência de isolamento
- Disparo do transformador para a alimentação no momento da operação de desalinhamento

CAUSA DA FALHA

- A vibração do envelope metálico, os conjuntos de barras e o emblema do fabricante.
- Uma contaminação anormal do pó.
- Um incremento por vapor gorduroso e poeira.
- Os conversores eletrônicos estão mal conectados ou a tensão de alimentação não está em conformidade. Os fusíveis são mal calibrados. Os transformadores de corrente (TC) são saturados pelas correntes com intertravamento. Começando com a massa ou entre espirais de enrolamento do transformador

CONSEQUÊNCIAS

- Aquecimento excessivo
- Deformação
- Sem tensão

PLANO DE MANUTENÇÃO

- Supervisão especial, condicional / manutenção preventiva
- Reveja os fixadores e os painéis e suportes de fixação.
- Verificar o estado mecânico do transformador.
- Medidas de ruído.
- Verifique a hipertensão das bobinas de tempo e equilíbrio.
- Rever a determinação da placa.
- Inalar a poeira e limpar todas as partes acessíveis, em seguida, soprar o transformador para o nitrogênio ou ar seco.
- Use um desengraxante frio para limpar a resina e bloquear.
- Verificar a ligação e a alimentação com as tensões especificadas no caso dos conversores electrónicos.

DETECÇÃO DE FALHAS

- Ruído
- Visual
- Calor

Figura 4.54 – Detalhes da FMECA (Transformador).

5. Conclusões e recomendações

Como objetivo principal se tinha elaborar um software com a capacidade de fornecer um diagnóstico de falhas futuras, modelar a confiabilidade do sistema e dos componentes e estabelecer uma política de manutenção, como resultado se obteve que é possível identificar, por meio do programa GEMACC, o estado da máquina em um período de teste ou tempo de diagnóstico apenas com os parâmetros de distribuição de probabilidade que, em nosso caso, são utilizadas a distribuição exponencial e de Weibull, considerando que a análise dos dados do histórico já foram realizados, determinando assim a distribuição mais adequada com ajuda do teste de aderência.

Devido aos dados que foram disponíveis surgiram dois resultados considerando apenas falhas e o outro considerando falhas e reparos, onde os resultados obtidos da simulação do módulo de Análise de Falhas, nos permitem conferir que para diferentes tipos de distribuições que sejam usadas, diferentes serão os resultados obtidos, é claro que a decisão de que tipo de distribuição usar dependerá do usuário, pois se escolher a distribuição exponencial considerando o resultado nesse tempo determinado, indicará que a máquina ou equipamento possa continuar operando sem problemas e além em ótimas condições, porém, a distribuição de Weibull, indica que o pessoal de manutenção tem que estar alerta para atuar e realizar as ações que sejam necessárias para ter uma operabilidade ótima do sistema. Ademais nesse mesmo módulo é possível realizar melhorias no tempo de manutenção modificando a distribuição de probabilidade de um ou vários componentes, dependendo da necessidade. Não melhora apenas o tempo de manutenção mas também a confiabilidade do sistema e permite ter ótimas condições de trabalho. Nesse primeiro módulo é usado unicamente o método de diagrama de blocos, que também nos permitiu testar o estado futuro de um sistema e avaliar se depois de um tempo destinado para uma missão de trabalho, o sistema está ainda em condições ótimas, e assim, se ainda depois daquele tempo as condições não mudam, o sistema poderia realizar o trabalho por mais tempo sem parar o que resultaria em ganho para a empresa e otimizaria aquele processo, evitando manutenções desnecessárias. Embora o método de diagrama de blocos, dê como resultado um diagnóstico preliminar bom, para que os resultados sejam totalmente confiáveis se necessitará de uma base de dados do histórico grande.

No segundo módulo foi introduzido mais um método além do diagrama de blocos, que é a análise de Markov, sendo uma ferramenta muito potente, pois a vantagem em

comparação com o método de diagrama de blocos não precisa de uma base de dados tão grande, como foi demonstrado no sistema de transformador (histórico de um ano), claro que o resultado seria apenas uma aproximação mas permitiria poupar tempo se o usuário desejar saber o estado da máquina, pois o valor da ocorrência calculado poderia se inserir dentro da opção FMECA, que são apresentados nesse mesmo modulo. Finalmene, embora tenham sido analisados diferentes sistemas, e cada um com diferentes critérios e níveis de severidade, ocorrência e detectabilidade, o programa GEMACC demonstrou que os resultados obtidos atingem os objetivos do usuário.

Embora os resultados obtido na dissertação tenham sido muito bons, a análise pode ser melhorada conhecendo as limitações, aperturando assim caminhos para novas linhas de pesquisa, sabendo que nos resultados, os cálculos realizados permitiram conhecer as políticas de manutenção de cada componente, no entanto é necessário saber a prioridade para realizar uma manutenção, para isso uma empresa precisa saber quais seriam aqueles componentes críticos, o que permite não apenas investir menos para sua manutenção, mas também que melhorem a confiabilidade do sistema. Por outra parte seria recomendável realizar a mesma análise com os mesmos ou outros sistemas, dos quais se possua o histórico de falhas e reparos para poder estimar uma melhor distribuição de probabilidade e conseguir melhores resultados. Da mesma forma, realizar análise para subsistemas com cargas compartilhadas e estabelecer uma política de manutenção que possa melhorar cada subsistema e, conseqüentemente, o sistema total. Um ponto em que seria bastante interessante evoluir seria na parte de programação, estabelecendo um algoritmo que permita editar a dependência e distribuição dos componentes não apenas no código (base de dados), mas também criar um novo sistema a partir de zero. Finalmente para validar o software com dados e resultados experimentais seria excelente testar o programa em sistemas que estão em operação na indústria para avaliar respostas e conhecer os resultados.

6. Referências Bibliográficas

- [1] X. Jiang, F. Duan, H. Tian, and X. Wei, “Optimization of reliability centered predictive maintenance scheme for inertial navigation system,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 140, pp. 208–217, 2015.
- [2] R. M. L. Martins, “Válcula de alta confiabilidade para aplicação em sistemas submarinos de produção de petróleo,” Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 1997.
- [3] B. O. B. Mkandawire, N. Ijumba, and A. Saha, “Transformer risk modelling by stochastic augmentation of reliability-centred maintenance,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 471–477, 2015.
- [4] B. Yssaad, M. Khiat, and A. Chaker, “Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 108–115, 2014.
- [5] B. Yssaad and A. Abene, “Rational Reliability Centered Maintenance Optimization for power distribution systems,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 350–360, 2015.
- [6] J. Wang, C. Fu, K. Yang, X. Zhang, G. Shi, and J. Zhai, “Reliability and availability analysis of redundant BCHP (building cooling , heating and power) system,” *Energy*, vol. 61, pp. 531–540, 2013.
- [7] Department of Defense United States of America, *MILITARY STANDARD, Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis*. Washington, D.C., 1980.
- [8] B. J. Richard, *Risk-Based Management a Reliability-Centered Approach*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1995.
- [9] J. Moubray, *Reliability Centered Maintenance II*, Second Edi. New York: Industrial Press Inc., 1997.
- [10] R. Keith, *Maintenance Fundamentals*, 2nd Editio. Oxford, UK: Elsevier B.H., 2004.
- [11] M., André, and P. A. Norberto, *Introdução à Gestão da Manutenção*. Florianópolis, 2007.
- [12] NASA, *RCM Guide for Facilities and Collateral Equipment*, no. September. Washington, D.C., 2008.
- [13] P. P. Jagathy and V. P. Deepak, “CBM , TPM , RCM and A-RCM - A

- Qualitative Comparison of Maintenance Management Strategies,” *Int. J. Manag. Bus. Stud.*, vol. 4, no. 3, pp. 49–56, 2014.
- [14] S. G. da Silva, “Confiabilidade de Equipamentos Submarinos de Segurança de Sondas Flutuantes (Blowoutpreventers - BOPS),” Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- [15] G. C. da Rocha, “Estudo da confiabilidade funcional dos sistemas de potência elétrica, de automação e de lastro para a manutenção do equilíbrio de uma plataforma FPSO,” Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2008.
- [16] M. Akbari and P. Khazaei, “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers,” in *28th International Power System Conference*, 2013, pp. 1–7.
- [17] D. M. Barends, M. T. Oldenhof, M. J. Vredenburg, and M. J. Nauta, “Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA,” *J. Pharm. Biomed. Anal.*, vol. 64–65, pp. 82–86, 2012.
- [18] H. Reza, N. Akar, H. Lotfizadeh, M. Bairampour, and S. Nasiri, “Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 72, pp. 69–76, 2013.
- [19] H. Arabian-Hoseynabadi, H. Oraee, and P. J. Tavner, “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 7, pp. 817–824, 2010.
- [20] W. Deng, Y. Chen, Y. Ren, L. Liu, and D. Yang, “A New Algorithm of GO Methodology Based on Minimal Path Set,” *AASRI Procedia*, vol. 3, pp. 368–374, 2012.
- [21] B. S. Dhillon, *Engineering Maintenance a Modern Approach*. Washington, D.C.: CRC PRESS, 2002.
- [22] SENAI, *Manutenção*. São Paulo, Brasil: Cleide Aparecida da Silva, 2000.
- [23] D. H. Shreve, “Integrated Condition Monitoring Technologies.” pp. 1–63, 2003.
- [24] K. S. Park and S. W. Han, “TPM — Total Productive Maintenance : Impact on Competitiveness and a Framework for Successful Implementation,” *Hum. Factors Ergon. Manuf.*, vol. 11, no. 4, pp. 321–338, 2001.
- [25] IAEA, *Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants*, IAEA., no. May. Vienna, Austria: IAEA, 2007.

- [26] S. Sydio and D. S. Unimep, “Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica,” in *XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Ouro Preto*, 2003, pp. 1–8.
- [27] SENAI-CFP, “Gestão da Manutenção,” *Telecurso 2000-Manutenção*, Minas Gerais, Brasil, 2000.
- [28] H. William and P. . Bartley, “Failure Analysis of Transformers,” *Hartford Steam Boil. Insp. Insur. Co.*, pp. 1–13, 2000.
- [29] D. Li and J. Gao, “Study and application of Reliability-centered Maintenance considering Radical Maintenance,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, 2010.
- [30] SINTEF, *Offshore and Onshore Reliability Data - OREDA*, 6th Editio. Norway: SINTEF, 2015.
- [31] T. T. SOONG, *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*, vol. 54. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [32] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 5th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [33] E. E. Lewis, *Introduction to Reliability Engineering*, 2nd Editio. New York, 1994.
- [34] B. Espstein and I. Weissman, *Mathematical Models for System Reliability*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2008.